

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

Nasazení vláknově optického zesilovače pro WDM-PON síť

**Deployment of Fiber Optic Amplifier into the WDM-PON
Network**

2016

Miroslav Večeřa

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Miroslav Večeřa

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Nasazení vláknově optického zesilovače pro WDM-PON síť
Deployment of Fiber Optic Amplifier into the WDM-PON Network

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je otestování zesilovačů pracujících v pásmech C, L pro WDM-PON síť a zjištění maximálního dosahu optické sítě. Práce vychází z požadavků praxe a je experimentální a simulační.

1. Popis a rozbor technologie WDM-PON.
2. Popis vláknově optického zesilovače pro WDM-PON síť.
3. Simulace vlastností topologie WDM-PON sítě se zapojeným zesilovačem v softwarové aplikaci Optiwave.
4. Vyhodnocení simulovaných dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] PREMARATNE, M., Agrawal, G., P. *Light Propagation in Gain Media: Optical Amplifiers*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 284 s. ISBN 978-0521493482.
- [2] BJARKLEV, A. *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications (The Artech House Optoelectronics Library)*, Vydání 1. Artech Print on Demand, 1993. 408 s. ISBN 978-0890066591.
- [3] SHIMADA, S., Ishio, H. *Optical Amplifiers and their Applications*, Vydání 1. John Wiley & Sons, 1994. 288 s. ISBN 978-0471940050.
- [4] LEE, T. P. *Current Trends in Optical Amplifiers and Their Applications (Selected Topics in Electronics and Systems)*. World Scientific Pub Co Inc, 1996. 222 s. ISBN 978-9810226954.
- [5] DUTTA, N a Qiang WANG. *Semiconductor optical amplifiers*. Vydání 2. ISBN 978-981-4489-034.
- [6] NEMOVA, G. *Optical Amplifiers (Physics Research and Technology)*. Nova Biomedical Books, 2011. 337 s. ISBN 978-1612098357.

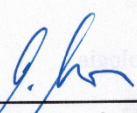
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

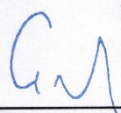
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016





doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *5. května 2016*


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Látalovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této práce bylo nasazení vláknově optického zesilovače do optické přístupové sítě využívající technologii WDM-PON v simulačním programu OptiSystem.

V první části práce je teoretický rozbor problematiky optických přístupových sítí. Dále popis technologie WDM-PON sítě a rozbor nejvyužívanějších optických zesilovačů. V praktické části práce je provedena samotná simulace při využití dvou lehce odlišných topologií sítí WDM-PON se zapojeným EDFA zesilovačem v různých částech sítě a různou délkou optické trasy. V každém měření jsou nakonec vyhodnoceny výsledky.

Klíčová slova

Optická přístupová síť, WDM-PON, optický zesilovač, EDFA, SOA, Ramanův zesilovač, OptiSystem, simulace, FTTx.

Abstract

In order of bachelory thesis was Deployment of Fiber Optic Amplifier into the WDM-PON Network in simulation program OptiSystem.

First part of thesis is theoretical analysis of issue of optical access network and description of WDM-PON technology and analysis of most common used optical amplifier. In practical part of thesis is implemented simulation with two different topologies of WDM-PON network with EDFA amplifier connected into different positions of optical route. After every measurement there are results evaluated.

Key words

Optical access network, WDM-PON, optical amplifier, EDFA, SOA, Raman amplifier, OptiSystem, simulation, FTTx

Obsah

Seznam použitých zkratk	- 11 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek	- 13 -
Úvod	- 19 -
1 Přístupová síť	- 20 -
1.1 Popis	- 20 -
1.2 Rozdělení	- 20 -
1.2.1 Podle typu spojení	- 20 -
1.2.2 Podle přenosového média	- 20 -
2 Optická přístupová síť	- 21 -
2.1 Struktura optické přístupové sítě	- 21 -
2.2 Rozdělení OAN	- 22 -
2.2.1 Aktivní optická síť	- 22 -
2.3 Optické přípojky FTTx	- 22 -
3 Pasivní optická síť PON	- 25 -
3.1 Parametry PON sítě	- 25 -
3.2 Princip PON sítě	- 25 -
4 WDM-PON	- 27 -
4.1 Vlnové multiplexy WDM	- 27 -
4.2 WWDM	- 27 -
4.3 DWDM	- 28 -
4.3.1 Flexibilní DWDM kanál	- 28 -
4.3.2 UDWDM	- 29 -
4.4 CWDM	- 29 -
4.5 Realizace sítě WDM-PON	- 30 -
4.6 Aktivní PON	- 32 -
5 Prvky v síti WDM-PON	- 33 -
5.1 Pasivní prvky	- 33 -
5.1.1 Pasivní rozbočovač	- 33 -
5.1.2 Optický Interleaver	- 33 -
5.1.3 Optický cirkulátor	- 33 -
5.1.4 AWG	- 33 -

5.1.5	ROADM	- 34 -
5.2	Aktivní prvky	- 34 -
5.2.1	Zdroje záření	- 34 -
5.2.2	Detektory optického záření	- 34 -
5.3	Optické Zesilovače	- 34 -
5.3.1	EDFA.....	- 35 -
5.3.2	Ramanovské zesilovače	- 36 -
5.3.3	Polovodičové zesilovače	- 36 -
6	Simulace v programu OptiSystem.....	- 39 -
6.1	Nastavené parametry WDM-PON sítí	- 39 -
6.2	Měřené parametry.....	- 39 -
6.2.1	Diagram oka.....	- 39 -
6.2.2	Bitová chybovost.....	- 40 -
6.2.3	Q-faktor	- 40 -
6.2.4	Odstup optického signálu od šumu.....	- 40 -
6.3	Použitý EDFA zesilovač	- 41 -
6.4	Simulace s použitím FP laseru	- 41 -
6.4.1	OLT	- 41 -
6.4.2	ODN	- 43 -
6.4.3	ONU	- 43 -
6.4.4	Výsledky	- 45 -
6.4.5	Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako předzesilovač	- 48 -
6.4.6	Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako booster	- 54 -
6.4.7	Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako in-line zesilovač	- 58 -
6.5	Simulace s použitím komponenty WDM transmitter	- 66 -
6.5.1	OLT	- 66 -
6.5.2	ODN	- 67 -
6.5.3	ONU	- 68 -
6.6	Výsledky	- 69 -
6.6.1	Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako předzesilovače.....	- 70 -
	- 72 -	
6.6.2	Trasa s nasazením EDFA zesilovače s režimu booster.....	- 78 -
6.6.3	Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako in-line	- 86 -

7	Zhodnocení	- 94 -
7.1	Zhodnocení pro topologii s FP laserem	- 94 -
7.2	Zhodnocení pro topologii s komponentou <i>WDM transmitter</i>	- 94 -
8	Závěr	- 96 -
	Použitá literatura	- 97 -
	Seznam příloh	xcix

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
ADSL2+	Asymmetric Digital Subscriber Line 2+
AON	Active Optical Network
APD	Avalanche photodiode
ASE	Amplified Spontaneous Emission
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BER	Bit Error Rate
CATV	Cable television
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex
DFB	Distributed Feedback laser
DRA	Distributed Raman Amplifier
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FDM	Frequency Division Multiplex
FP	Fabry Perot laser
FTTEx	Fiber To The Exchange
FTTH	Fiber To The Home
FTTN	Fiber to The Node
FTTO	Fiber To The Office
FTTP	Fiber To The Premises
FTTx	Fiber To The X
GPON	Gigabit Passive Optical Network
IPTV	Internet Protocol Television
ISI	Inter Symbol Interferences
LED	Light Emitted Diode
LRA	Lumped Raman Amplifier
NRZI	Non-return-to-zero inverted

NT	Network termination
OAN	Optical Access Network
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
PIN	Positive-Intrinsic-Negativ
PON	Passive Optical network
ROADM	Reconfigurable Optical ADD/DROP Multiplexer
SNR	Signal to Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SRS	Stimulated Raman scattering
TDM	Time Division Multiplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UDWDM	Ultra Dense Wavelength Division Multiplex
UTP	Unshielded Twisted Pair cable
VDSL2	Very-high-bit-rate digital subscriber line 2
WDD	Wavelength Division Duplex
WDM-PON	Wavelength Division Multiplex Passive Optical Network
WiFi	Wireless Fidelity
WiMaX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WWDM	Wide Wavelength Division Multiplex
xDSL	x Digital Subscriber Line

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
2.1	Schéma optické přístupové sítě [4]	16
2.2	Rozdělení optické přístupové sítě pomocí technologie	17
2.3	Znázornění přípojek FTTx	19
3.1	Princip přenosu v PON síti	21
4.1	Princip WDM	22
4.2	Ukázka flexibilního kanálu	24
4.3	Realizace WDM-PONs použitím pasivního rozbočovače	26
4.4	Realizace WDM-PON s využitím AWG	26
4.5	Realizace WDM-PON s využitím FP laseru	27
5.1	EDFA zesilovač	30
5.2	Ukázka SOA	32
5.3	Rozdíl mezi FP-SOA a TW-SOA	32
6.1	Ideální diagram oka s vyznačenými parametry	34
6.2	Vysílací část OLT jednotky	36
6.3	FP laser v OLT	37
6.4	Příjmací část OLT	37
6.5	ODN s EDFA zesilovačem v režimu booster	38
6.6	Vysílací část ONU	39
6.7	Fabry-Perotuv laser v ONU	39
6.8	Příjmací část ONU	40
6.9	Diagram oka pro OLT při 50km	41
6.10	Diagram oka pro ONU při 50km	41
6.11	Diagram oka pro OLT při 75km	42
6.12	Diagram oka pro ONU při 75km	42
6.13	Diagram oka pro OLT při 100km	43
6.14	Diagram oka pro ONU při 100km	43
6.15	Optické spektrum na konci trasy	44
6.16	Diagram oka pro OLT jednotku	44

6.17	Diagram oka pro ONU jednotku	44
6.18	Optické spektrum na konci trasy	45
6.19	Diagram oka pro OLT jednotky	45
6.20	Diagram oka pro ONU jednotky	45
6.21	Optické spektrum	46
6.22	Diagram oka pro OLT jednotky	47
6.23	Diagram oka pro ONU jednotky	47
6.24	Chybovost na straně ONU	47
6.25	Chybovost na straně OLT	48
6.26	Výkon na straně OLT	48
6.27	Výkon na straně ONU	48
6.28	Optické spektrum na konci trasy	49
6.29	Diagram oka pro OLT jednotky	50
6.30	Diagram oka pro ONU jednotky	50
6.31	Optické spektrum na konci trasy	51
6.32	Diagram oka pro OLT jednotky	51
6.33	Diagram oka pro ONU jednotky	51
6.34	Chybovost na OLT	52
6.35	Výkon na OLT	52
6.36	Výkon na ONU	53
6.37	Optické spektrum na konci trasy	54
6.38	Diagram oka pro OLT jednotky	54
6.39	Diagram oka pro ONU jednotky	54
6.40	Optické spektrum na konci trasy	55
6.41	Diagram oka pro OLT	55
6.42	Diagram oka pro ONU	56
6.43	Optické spektrum na konci trasy	56
6.44	Diagram oka pro OLT	57
6.45	Diagram oka pro ONU	57
6.46	Optické spektrum na konci trasy	58
6.47	Diagram oka pro OLT	58

6.48	Diagram oka pro ONU	58
6.49	Chybovost na straně OLT	59
6.50	Chybovost na straně ONU	59
6.51	Výkon na straně OLT	59
6.52	Výkon na straně ONU	60
6.53	OLT vysílací část	61
6.54	OLT přijímací část	62
6.55	ODN s EDFA zesilovačem v režimu předzesilovač	62
6.56	Vysílací část ONU	63
6.57	Přijímací část ONU	64
6.58	Diagram oka pro OLT jednotky	65
6.59	Diagram oka pro ONU jednotky	65
6.60	Optické spektrum na konci trasy	67
6.61	Diagram oka pro OLT	67
6.62	Diagram oka pro ONU	67
6.63	Optické spektrum na konci trasy	68
6.64	Diagra oka pro OLT	68
6.65	Diagram oka pro ONU	69
6.66	Optické spektrum na konci trasy	70
6.67	Diagram oka pro OLT jednotky	70
6.68	Diagram oka pro ONU jednotky	70
6.69	Optické spektrum na konci trasy	71
6.70	Diagram oka pro OLT jednotky	71
6.71	Diagram oka pro Onu jednotky	72
6.72	Chybovost na OLT	72
6.73	Chybovost na ONU	72
6.74	Výkon na OLT	73
6.75	Výkon na ONU	73
6.76	Optické spektrum	74
6.77	Diagram oka pro OLT jednotky	74
6.78	Diagram oka pro ONU jednotky	75

6.79	Optické spektrum na konci trasy	76
6.80	Diagram oka pro OLT jednotky	76
6.81	Diagram oka pro ONU jednotky	76
6.82	Optické spektrum na konci trasy	77
6.83	Diagram oka pro OLT jednotky	77
6.84	Diagram oka pro Onu jednotky	78
6.85	Optické spektrum na konci trasy	79
6.86	Diagram oka pro OLT jednotky	79
6.87	Diagram oka pro Onu jednotky	79
6.88	Chybovost na OLT	80
6.89	Chybovost na ONU	80
6.90	Výkon na OLT	80
6.91	Výkon na ONU	81
6.92	Optické spektrum na konci trasy	82
6.93	Diagram oka pro OLT jednotky	82
6.94	Diagram oka pro Onu jednotky	82
6.95	Optické spektrum na konci trasy	83
6.96	Diagram oka pro OLT jednotky	83
6.97	Diagram oka pro ONU jednotky	84
6.98	Optické spektrum na konci trasy	85
6.99	Diagram oka pro OLT jednotky	85
6.100	Diagram oka pro ONU jednotky	85
6.101	Optické spektrum na konci trasy	86
6.102	Diagram oka pro OLT jednotky	86
6.103	Diagram oka pro Onu jednotky	87
6.104	Chybovost ve vzestupném směru	87
6.105	Chybovost v sestupném směru	87
6.106	Výkon ve vzestupném směru	88
6.107	Výkon v sestupném směru	88

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
1.1	Ukázka frekvenční mřížky pro DWDM	23
1.2	Vlnové délky CWDM dle standartu ITU-T G.692.2	25
1.3	Srovnání zesilovačů	33
1.4	Parametry EDFA zesilovače WRA-217	36
1.5	Chybovost a Q-faktor	40
1.6	Výkon signálu a OSNR	40
1.7	Chybovost a Q-faktor	41
1.8	Výkon signálu a OSNR	41
1.9	Chybovost a Q-faktor	42
1.10	Výkon signálu a OSNR	42
1.11	Chybovost a Q-faktor	43
1.12	Výkon signálu a a OSNR	43
1.13	Chybovost a Q-faktor	44
1.14	Výkon signálu a a OSNR	45
1.15	Chybovost a Q-faktor	46
1.16	Výkon signálu a OSNR	46
1.17	Chybovost a Q-faktor	49
1.18	Výkon signálu a OSNR	49
1.19	Chybovost a Q-faktor	50
1.20	Výkon signálu a OSNR	50
1.21	Chybovost a Q-faktor	53
1.22	Výkon signálu a OSNR	53
1.23	Chybovost a Q-faktor	55
1.24	Výkon signálu a OSNR	55
1.25	Chybovost a Q-faktor	56
1.26	Výkon signálu a OSNR	56
1.27	Chybovost a Q-faktor	57

1.28	Výkon signálu a OSNR	57
1.29	Chybovost a Q-faktor	64
1.30	Výkon signálu a OSNR	65
1.31	Chybovost a Q-faktor	66
1.32	Výkon signálu a OSNR	66
1.33	Chybovost a Q-faktor	68
1.34	Výkon signálu a OSNR	68
1.35	Chybovost a Q-faktor	69
1.36	Výkon signálu a OSNR	69
1.37	Chybovost a Q-faktor	71
1.38	Výkon signálu a OSNR	71
1.39	Chybovost a Q-faktor	73
1.40	Výkon signálu a OSNR	74
1.41.	Chybovost a Q-faktor	75
1.42	Výkon signálu a OSNR	75
1.43	Chybovost a Q-faktor	77
1.44	Výkon signálu a OSNR	77
1.45	Chybovost a Q-faktor	78
1.46	Výkon signálu a OSNR	78
1.47	Chybovost a Q-faktor	81
1.48	Výkon signálu a OSNR	81
1.49	Chybovost a Q-faktor	83
1.50	Výkon signálu a OSNR	83
1.51	Chybovost a Q-faktor	84
1.52	Výkon signálu a OSNR	84
1.53	Chybovost a Q-faktor	86
1.54	Výkon signálu a OSNR	86

Úvod

V době vzestupu telekomunikačních služeb jako je IP telefonie, IPTV a Internet nejčastěji jako jedna služba, dochází ke zvyšování nároků na optické přístupové sítě. V každé optické trase dochází k útlumům a optický signál po určité vzdálenosti degraduje. Proto využíváme optické zesilovače, které nám dovolují překlenout vzdálenosti až přes 100 km.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány pasivní optické přístupové sítě, technologie vlnového dělení a nejčastěji používané optické zesilovače.

V praktické části je provedena simulace v programu OptiSystem. Simulovali jsme dvě WDM-PON sítě, každou s jiným použitým optickým zdrojem. Do optické trasy jsme poté připojili optický zesilovač. Naměřená data jsme pro danou topologii s připojeným optickým zesilovačem analyzovali a to především přijaté výkonové úrovně, chybovost a Q-faktor.

1 Přístupová síť

1.1 Popis

Pod pojmem přístupová síť si můžeme představit přenos signálu mezi účastníky a síťovými uzly, popřípadě souhrn technických prostředků, které umožní přístup zákazníka ke službám poskytovatele sítě. Přístupovou síť tedy můžeme chápat, jako telekomunikační prostředky, zajišťující koncovým uživatelům přístup k prvnímu uzlu sítě za účelem transferu signálu mezi účastníkem a uzly přístupové sítě, neboli k překlenutí takzvané poslední míle. [4] Tyto sítě tedy překlenují vzdálenosti v jednotkách kilometrů.

1.2 Rozdělení

Přístupové sítě se nejčastěji rozdělují pomocí typu spojení nebo podle přenosového média.

1.2.1 Podle typu spojení

- Point to Point (spojení Bod-Bod) – Propojení poskytovatele služeb ke koncovému účastníkovi vyhrazeným vláknem, popřípadě dvěma vlákny, jeden pro vzestupný a druhý pro sestupný směr. Nevýhoda je vyšší pořizovací cena, naproti tomu máme nesdílené médium pro koncového účastníka [6].
- Point to Multipoint (Vícebodové spojení) – Propojení poskytovatele služeb a účastníka pomocí sdíleného vlákna při využití časového nebo vlnového multiplexu.

1.2.2 Podle přenosového média

- Metalické – nejčastěji se využívají kroucené dvojlinky a koaxiální kabely
- Rádiové – Satelitní spoje, WiFi, WiMaX a mobilní sítě
- Optické – Využití optického vlákna, Sítě typu PON, AON. Kde se krom optického vlákna využívají Optické směrovače, rozbočovače filtry atd. (prvkům v optické síti se budu věnovat samostatně v kapitole č. 5 WDM-PON).
- Hybridní – Kombinace předešlých typů spojení.

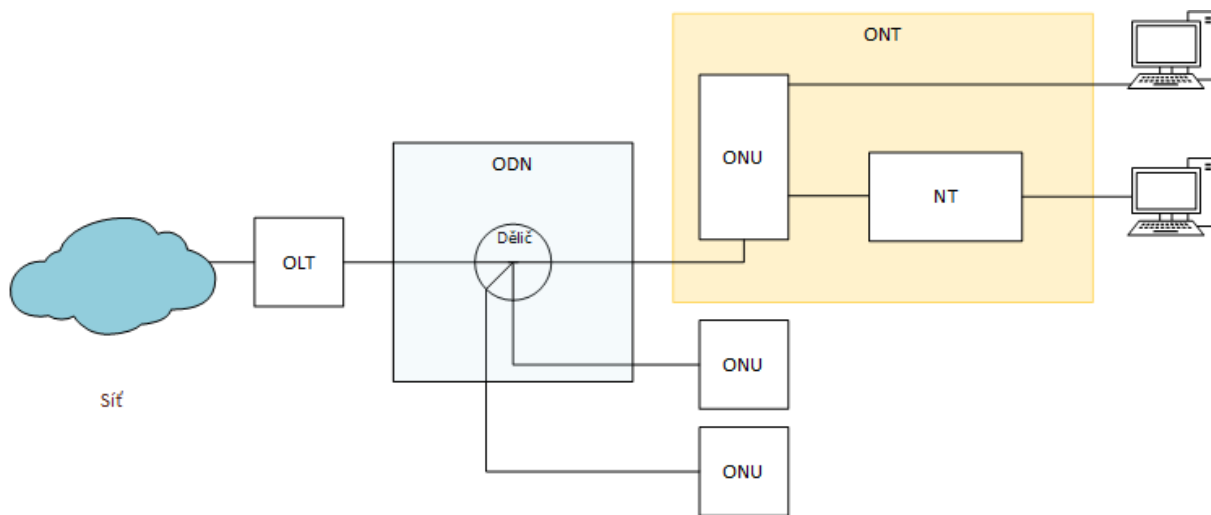
2 Optická přístupová síť

V dnešní době rozmachu telekomunikačních služeb pro koncové zákazníky, jako je například služba Triple play, tedy IP telefonie, IPTV a Internet, jsou na přístupovou síť kladeny větší nároky. Na uspokojení těchto požadavků se zvyšují nároky na přenosové rychlosti a další parametry přístupových sítí [1]. K tomu se nejčastěji využívají přípojky FTTx, ke kterým se vrátím v podkapitole č. 2.3.

2.1 Struktura optické přístupové sítě

Na obrázku č. 2.1 je znázorněna struktura optické přístupové sítě. Tato síť je složena z [5]:

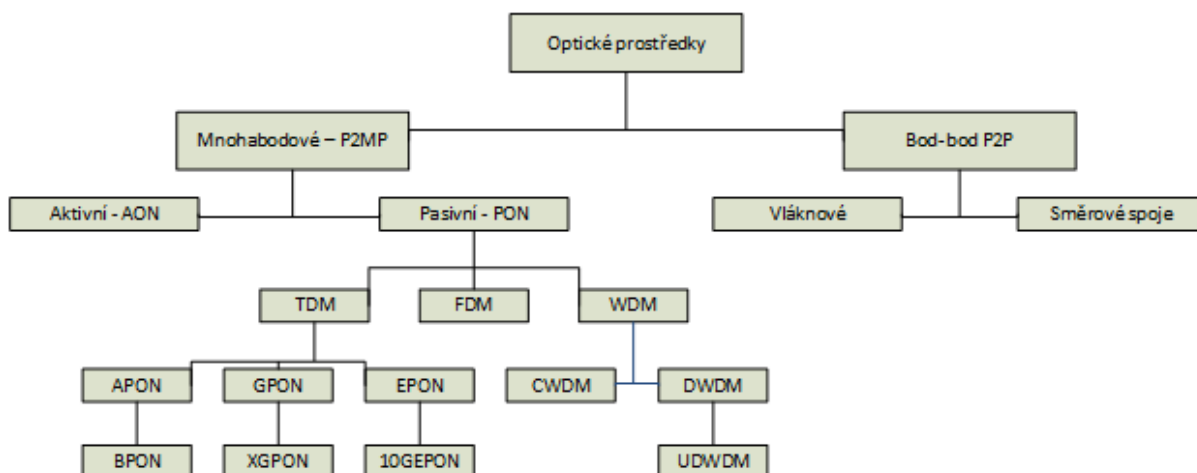
- OLT – (Optical Line Termination) Zajišťuje rozhraní mezi přístupovou sítí a telekomunikační sítí.
- ODN – (Optical Distribution Network) Souhrn veškerých prvků a prostředků mezi jednotkami OLT a ONU/ONT. Jedná se především o rozbočovače, vlnové filtry, pasivní prvky a konektory.
- ONT – (Optical Network Termination) Je koncová optická jednotka na straně uživatele. ONT je tedy většinou využívána jako opticko-metalický konvertor pro připojení uživatelského koncového zařízení na bázi Ethernet [1]
- ONU – (Optical Network Unit) Obecná ukončující jednotka na uživatelské straně sítě zastávající stejnou funkci jako ONT.
- NT – (Network Termination) Síťové zakončení užívající se v telekomunikacích na straně uživatele



Obrázek 2.1: Schéma optické přístupové sítě [4]

2.2 Rozdělení OAN

Na následujícím obrázku č. 2.2 jsou znázorněné technologie používané v OAN (Optical Access Network). V této práci se zaměřím především na pasivní optické sítě a technologii vlnového multiplexu (WDM).



Obrázek 2.2: Rozdělení optické přístupové sítě pomocí technologií [3]

Jak lze již z obrázku vidět, pro OAN se většinou využívá spojení typu Point to Multipoint, kterou bychom mohli dále rozdělit na Aktivní a Pasivní síť. Každá ze zmiňovaných sítí má své výhody a nevýhody. O PON sítích se budu dále věnovat v samostatné kapitole č. 3.

2.2.1 Aktivní optická síť

Aktivní optické sítě vyžadují pro svůj provoz aktivně napájené prvky. To navyšuje cenu údržby takového systému, na druhou stranu je zde možnost regenerovat optický signál a překlenout tak mnohem vyšší vzdálenosti.

2.3 Optické přípojky FTTx

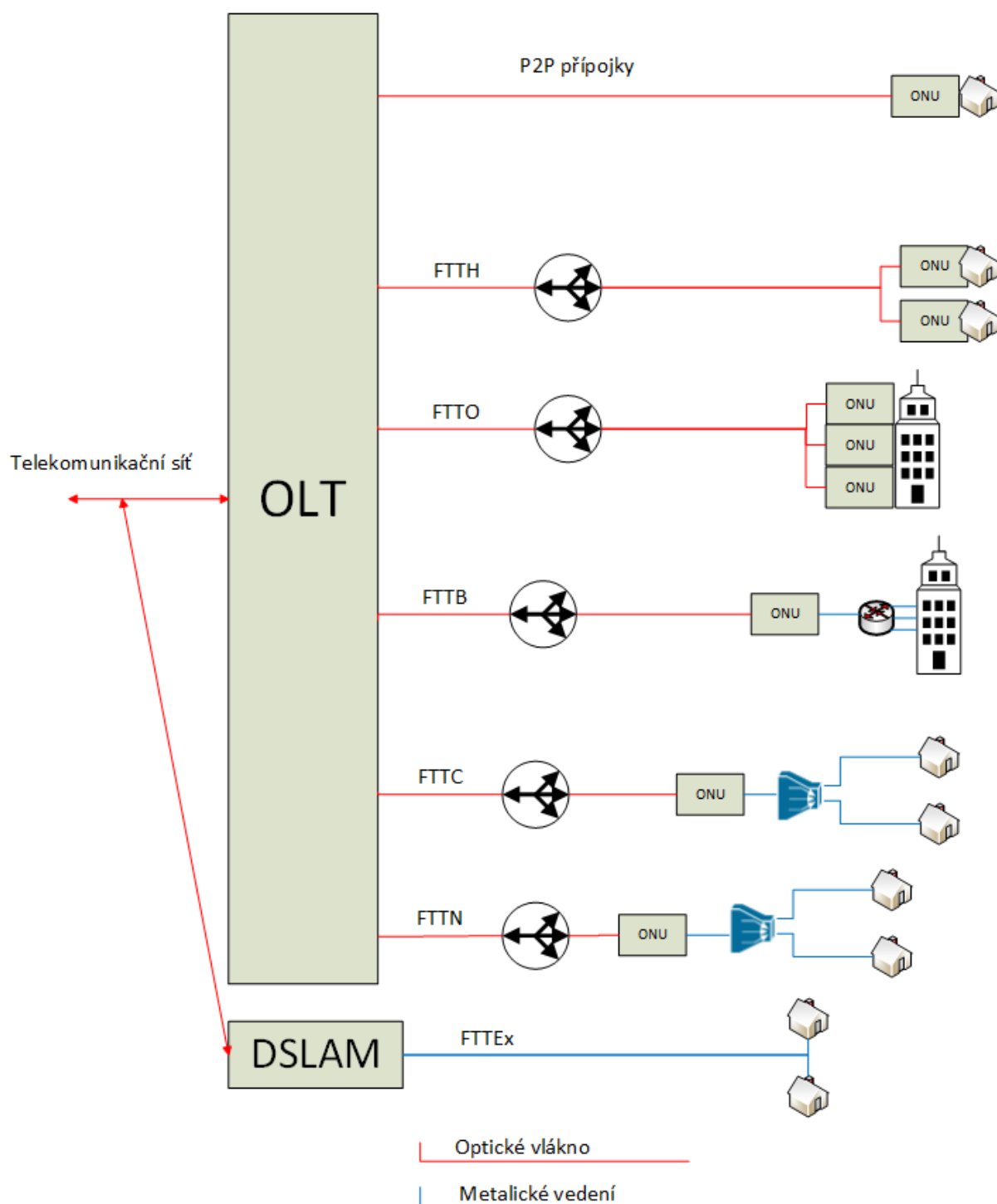
Označení FTTx, tedy Fiber to The "x" se využívá jako označení pro ukončení optické přístupové sítě v blízkosti koncového uživatele. Můžeme využít přímo spojené P2P přípojky ukončené přímo u koncového uživatele, což je finančně náročné kvůli cenám optického vlákna a jeho pokládce [4]. Proto se nejčastěji využívají přípojky ukončené v blízkosti koncových uživatelů, ale pro přímé spojení se již využívá metalická, popřípadě rádiová infrastruktura. Tento způsob připojení snižuje náklady na výstavbu, ale také je zde větší využití přenosového pásma, jelikož můžeme připojit více koncových zařízení pomocí jedné optické přípojky. Nejčastější přípojky jsou tyto [1] :

- FTTH (Fiber To The Home) - Optické vlákno je přivedeno až do objektu uživatele, jedná se o čistě optickou P2P přípojku. Dokáže nabídnout nejvyšší přenosovou rychlost, v dnešní době typicky 100 Mbit/s. Jedná se také o finančně nejnáročnější přípojku. Většinou je tato přípojka realizována jako nesymetrická, tedy vyšší rychlost v sestupném směru než vzestupném.
- FTTO (Fiber to the Office) - Optická přípojka je obdobně jako přípojka FTTH přivedena ke koncovému uživateli. Avšak je určena především pro připojení firemních a

průmyslových prostor, nemocnic, škol apod. Tato přípojka bývá realizována jako symetrická. Bývají zde kladeny větší nároky na spolehlivost, odezvu a redundanci.

- FTTP (Fiber To The Premises) - Obecné označení pro přípojky FTTH a FTTO, popřípadě jejich kombinaci.
- FTTB (Fiber To The Bulding) - První možnost kombinace optické a navazující metalické sítě. Jak název napovídá, přípojka je přivedena do budovy či obytných komplexů [1]. optické vlákno je typicky přivedeno do suterénu budovy kde je zakončena síťovým zakončením ONT nebo síťovou jednotkou ONU. V síťovém zakončení bývá typicky metalický výstup na bázi Ethernetu, který je přiveden na centrální přepínač či směrovač. K jednotlivým uživatelům je připojení distribuováno většinou již existující infrastrukturou jako je strukturovaná kabeláž s typickými UTP kabely, které mohou překlenout vzdálenost maximálně 100 metrů.
- FTTC (Fiber To the Curb) - Tato přípojka je zakončena v delší vzdálenosti od koncových uživatelů, typicky do 300 metrů. Síťová jednotka ONU může být instalována do venkovního rozvaděče. Pro distribuci ke koncovým zařízením se zde využívají systémy typu xDSL, zejména VDSL2, z důvodu větší vzdálenosti od ONU. Proto je ve venkovním rozvaděči umístěn taky digitální multiplexor DSLAM a s využitím místní metalické infrastruktury jsou připojeni vlastní uživatelé.
- FTTN (FiberTo The Node) - Další posunutí přípojky směrem k optické části přístupové sítě, dál od uživatele. Rozdíl mezi FTTN a FTTC se považuje vzdálenost od koncového uživatele, kde hranicí je přibližně 300 metrů. S venkovní instalací ONU se také instaluje digitální multiplexor DSLAM kde se rovněž využívá technologií xDSL, především VDSL2 a ADSL2+ [7].
- FTTE_x (Fiber To The Exchange) - Tato přípojka je nejvzdálenější od koncového uživatele. Uživatelé jsou připojeni k digitální ústředně DSLAM po metalickém vedení. Pouze samotný multiplexor je připojen pomocí optické sítě.

Na Obrázku č. 2.3 jsou znázorněny základní typy přípojek FTT_x.



Obrázek 2.3: Znáznornění přípojek FTTx [7]

3 Pasivní optická síť PON

Pasivní sítě využívají čistě pasivní prvky bez nutnosti napájení, tím se snižuje náročnost na samotnou údržbu i pořizovací cenu. Nevýhodou tohoto řešení je nemožnost regenerace signálu. Existuje řešení aktivní PON sítě, kde se do čistě pasivní sítě nasadí optovláknový popřípadě polovodičový zesilovač. Dále je třeba dbát na útlumové bilance všech prvků v síti, abychom byli schopni zajistit bezproblémový chod sítě [1]. Primární určením těchto sítí je připojení většího počtu koncových uživatelů, proto slouží k překlenutí vzdáleností v jednotkách kilometrů. Nejčastější technologií pro sdílený přístup k médiu je v dnešní době časové multiplexování TDM. [1] Jak lze ale na obrázku č. 2.2 vidět, využívá se taky frekvenční a vlnové multiplexování FDM a WDM.

3.1 Parametry PON sítě

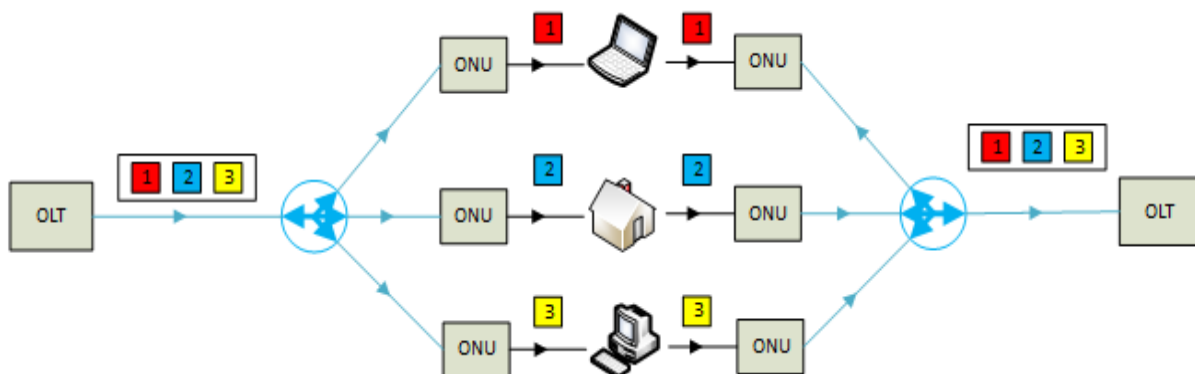
Jak již bylo zmíněno, v PON sítích se nacházejí pouze pasivní prvky. Z tohoto důvodu musí splňovat určité technické parametry pro bezchybný přenos, jako jsou [1]:

- Fyzický dosah - Maximální překlenutá vzdálenost s přihlédnutím k fyzikálním možnostem použitých detektorů a optických zdrojů v optické distribuční síti ODN.
- Logický dosah - Teoretická překlenutá vzdálenost distribuční sítě ODN bez přihlédnutí k fyzikálním omezením, vzhledem k použitým protokolům.
- Rozdíl vzdáleností koncových uživatelů - Tento parametr nám udává maximální vzdálenost mezi nejbližší síťovou jednotkou ONU/ONT a nevzdálenější síťovou jednotkou ONU/ONT připojené ke stejnému optickému linkovému zakončení OLT. Využívá se zejména pro zjištění největšího rozdílu mezi dobou šíření k nejbližším a nejvzdálenějším koncovým bodům.
- Střední doba šíření signálu - průměrné zpoždění signálu v obou směrech.
- Rozbočovací poměr - Vyjadřuje maximální počet účastníků připojených do jedné sítě. S rostoucím počtem účastníků se také mění poměrná přenosová kapacita na jednoho koncového uživatele.
- Maximální a minimální překlenutelný útlum - Síť musí splňovat oboustranné limity překlenutelného útlumu pro danou variantu PON sítě. Spodní limit je definován s ohledem na přebuzení fotodetektorů a jeho možného poškození. Vrchní hranice je naopak definována s přihlédnutím na citlivost fotodetektorů tak, aby byla splněna přípustnost chybovosti v přenosu.

3.2 Princip PON sítě

Zdrojový signál z telekomunikační sítě je z jednotky OLT přiveden po optickém vlákně do optického děliče (splitter), který bývá umístěn v co nejbližší vzdálenosti ke koncovým účastníkům. Tento dělič může signál rozdělovat v různém poměru (nejčastěji násobky 2), typický využívaný poměr je 1:32 nebo 1:64. Každé účastnické zařízení je zakončeno pomocí ONT nebo ONU, tato jednotka poté zajišťuje přenos odchozího signálu na vlnové délce 1310nm. OLT naopak zajišťuje příjem signálu na vlnové délce 1490nm, popřípadě 1550nm pro CATV [8]. Tato použitá technologie se jmenuje WDD (Wavelength Division Duplex). Pro obousměrný, tedy duplexní, provoz se dá také využít dvojice oddělených vláken, kde každé vlákno bude využito pro jiný směr.

Signál šířený směrem ke koncovému uživateli je přenášen spolu s daty ostatních uživatelů. Aby se zabránilo nežádoucímu odposlechu, je signál zašifrován. Pro přenos signálu od uživatele se využívá časového dělení TDM. A to z důvodu spojování optických vláken do jednoho, tudíž je zapotřebí zajistit aby v jednu chvíli vysílal pouze jeden uživatel a zabránilo se tak nežádoucím kolizím a degradaci signálu [4].



Obrázek 3.1: *Princip přenosu v PON síti [4]*

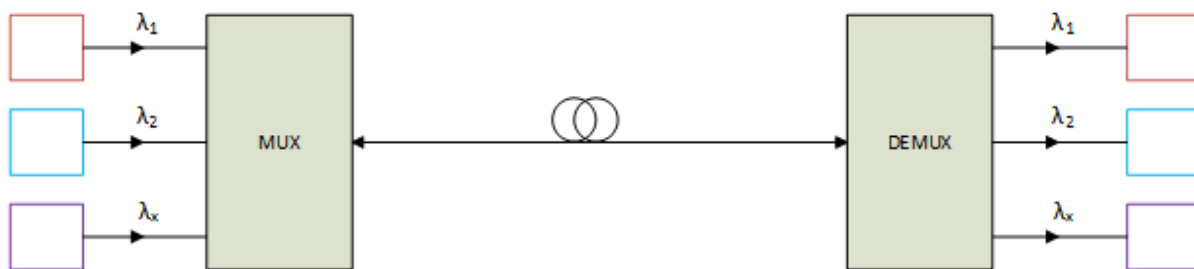
4 WDM-PON

V dnešní době bylo diskutováno mnoho řešení PON sítí, ale nasazovány jsou především dvě řešení na bázi TDMA (Time Division Multiplex Access). Jsou to GPON (Gigabit PON) ze specifikace ITU-T G.984, která je nasazována především v Evropě a Spojených státech amerických, a EPON ze specifikace IEEE 802.3ah, která je nasazována především v Japonsku a Koreji [9]. Tyto systémy a systémy z nich vyvozené se již blíží ke svým pomyslným limitům. Jako další generace optických přístupových sítí se zdají být perspektivní systémy založené na vlnovém multiplexování WDM (Wavelength Division Multiplex). Tedy navazování vícero vlnových délek do jednoho vlákna, kde každá vlnová délka je specifikována pro daný systém.

4.1 Vlnové multiplexy WDM

Hlavní myšlenkou WDM je sdružení několika optických kanálů, neboli několik vlnových délek, do jednoho optického vlákna. Tyto optické kanály jsou odděleny vlnově či v podstatě frekvenčně. Na každou frekvenci je namodulována požadovaná informace. Poté se v multiplexoru všechny optické kanály navážou do jednoho vlákna. Pro n kanálů potřebujeme také n modulátorů, zdrojů světla a demodulátorů. WDM-PON systémy můžeme rozdělit podle šířky rozestupů jednotlivých optických kanálů.

- WWDM (Wide WDM) - Široký multiplex
- CWDM (Course WDM) - Hrubý multiplex
- DWDM (Dense WDM) - Hustý multiplex
- UDWDM (Ultra Dense WDM) - Ultra hustý multiplex



Obrázek 4.1: *Princip WDM*

4.2 WWDM

Takzvaně široký vlnový multiplex WWDM patří ke starším způsobům realizace WDM-PON. Jeho výhody jsou v nízkých nákladech na realizaci pasivní optické sítě. Využívá se zde většinou jen čtyř optických kanálů v optickém pásmu 1310nm s rozestupem jednotlivých kanálů $>20\text{nm}$.

4.3 DWDM

Technologie takzvaného hustého multiplexu DWDM využívá velmi malý odstup mezi kanály, typicky je to v rozmezí 0,8nm až 0,1nm. Tudíž je schopný navázat do jednoho vlákna desítky optických kanálů. Toto řešení drasticky navyšuje přenosovou kapacitu optického spoje. Dnešní systémy jsou schopny přenášet 2,5 a 10 Gbit/s na jednom optickém kanálu. Kde počet kanálů se počítá v desítkách, běžně se využívá až 96 kanálů [8]. Použití těchto systémů byl umožněn díky optickým zdrojům s velmi úzkou spektrální čarou, jako jsou DFB lasery. Tyto optické zdroje musí být tepelně stabilizované, to navyšuje jak jejich pořizovací cenu tak i provozní náklady. Výhodou je použití pásme C a L kde optické vlákna dosahují nejmenšího útlumu a mají téměř plochou charakteristiku.

Doporučení ITU-T G694.1 specifikuje čtyři různé druhy kanálů s různou šířkou v pásmech S, C a L. A to:

- Pro kanály se šířkou 12,5GHz, což odpovídá cca 0,1nm, se vztahem $193,1 + n * 0,0125 [THz]$ Kde n je kladné či záporné celé číslo.
- Pro kanály se šířkou 25GHz, což odpovídá cca 0,2nm, se vztahem $193,1 + n * 0,025 [THz]$ Kde n je kladné či záporné celé číslo.
- Pro kanály se šířkou 50GHz, což odpovídá cca 0,4nm, se vztahem $193,1 + n * 0,05 [THz]$ Kde n je kladné či záporné celé číslo.
- Pro kanály se šířkou 100GHz, což odpovídá cca 0,8nm, se vztahem $193,1 + n * 0,1 [THz]$ Kde n je kladné či záporné celé číslo.

Nominální středová frekvence (THz)				Přibližná nominální středová vlnová délka (nm)
12,5GHz	25GHz	50GHz	100GHz	
195.8875				1530.4318
195.8750	195.875			1530.5295
195.8625				1530.6471
195.8500	195.850	195.85		1530.7248
195.8375				1530.8225
195.8250	195.825			1530.9203
195.8125				1531.0180
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.1157

Tabulka 1.1: Ukázka frekvenční mřížky pro DWDM [11]

4.3.1 Flexibilní DWDM kanál

Doporučení ITU-T G694.1 dále umožňuje využití dynamických slotů pro technologii DWDM o různé šířce. Tyto sloty lze kombinovat s pevně přiřazenými kanály za podmínky, že se navzájem nepřekrývají a neruší. [11]

- Pro určení nosné frekvence slouží vztah:

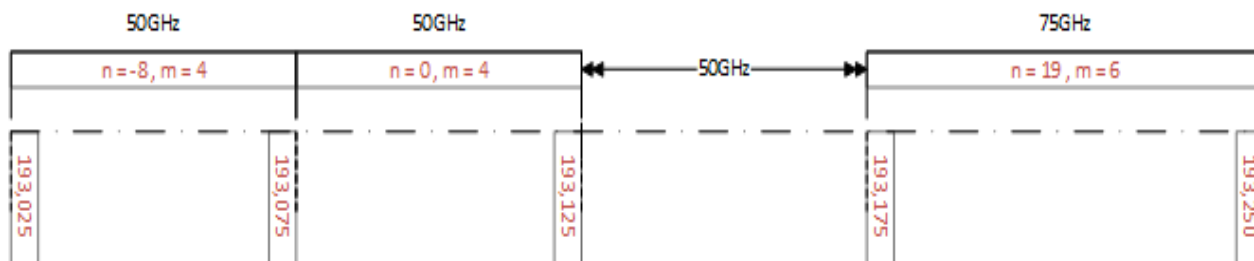
$193,1 + n * 0,00625 [THz]$ Kde n je kladné či záporné celé číslo.

- Šířka kanálu je definována vztahem

$m * 12,5 [GHz]$ Kde m je kladné či záporné celé číslo

Jednoduše řečeno, nosná frekvence je vždy násobek 6,25GHz, zatímco šířka slotu je násobek 12,5GHz.

Hlavní myšlenka zavedení flexibilního kanálu pro DWDM systém je umožnění míchání různých forem modulací přenosových systému pro lepší využití přenosového pásma.



Obrázek 4.2: Ukázka flexibilního kanálu [11]

4.3.2 UDWDM

Ultra hustá vlnový multiplex je uvažován s velmi jemnou frekvenční mřížkou jako další krok WDM technologie. Uvažuje se zde o kanálech se šířkou pouhých 6,25 GHz s rychlostí 1,25 Gbit/s na uživatele. Toto řešení je ve fázi testování a zatím se uskutečnilo pouze v laboratorních podmínkách [13].

4.4 CWDM

Takzvaný hrubý multiplex CWDM byl vytvořen jako levnější varianta DWDM [8]. Odstup mezi jednotlivými kanály jsou větší než u DWDM a jsou navrženy taky, aby bylo možno použít levnějších nechlazených optických zdrojů. Ze standartu ITU-T G-694.2 se předpokládá využití laserových zdrojů s celkovou tolerancí od nominální středové vlnové délky o +/- 6-7 nm. Dále jsou zde definované kanály pro CWDM systém jak zle vidět v tabulce č. 1.2. První nosná začíná na 1271nm a poslední nosná na 1611nm s rozestupem jednotlivých kanálů 20nm. Pro standartní jednovláknové vlákno dle ITU-T G.652 je celkem 18 využitelných optických kanálů pro systémy CWDM.

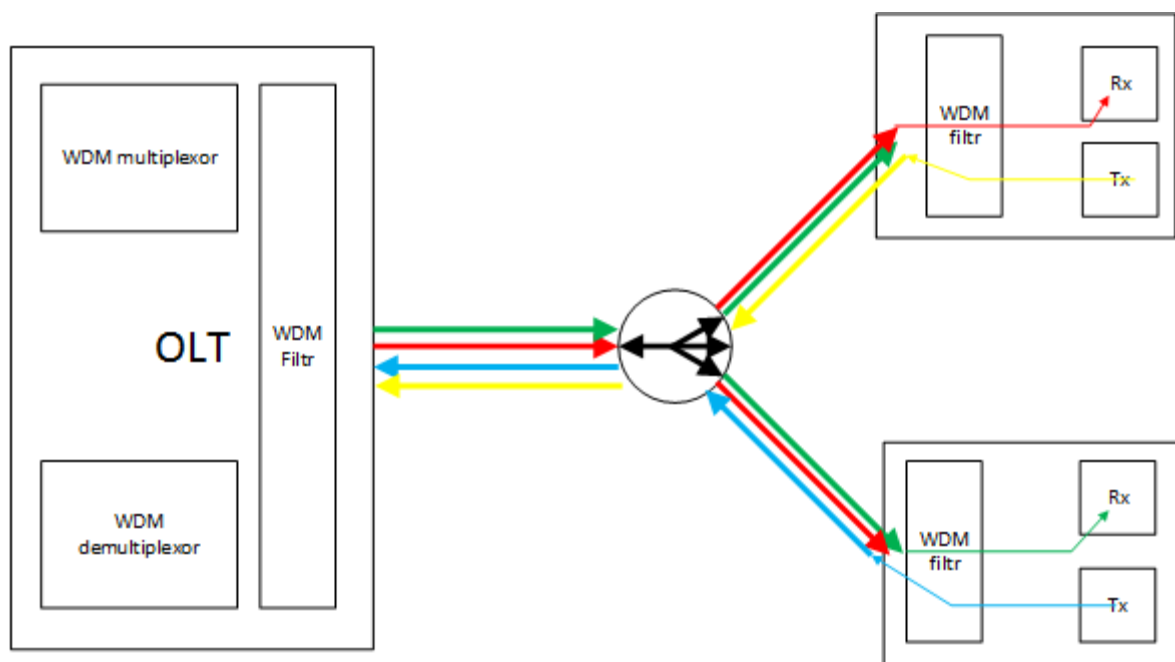
Multiplexování CWDM se využívá zejména pro metropolitní sítě kde se překlenutelná vzdálenost pohybuje kolem desítek kilometrů. V praxi se využívají optické kanály z pásem S, C a L pro delší vzdálenosti, zatímco kanály z pásma O a L se využívají pro lokální sítě.

Nominální středové vlnové délky (nm) pro CWDM s rozestupem 20 nm	Pásmo
1271	O
1291	
1311	
1331	
1351	
1371	E
1391	
1411	
1431	
1451	
1471	S
1491	
1511	
1531	
1551	C
1571	L
1591	
1611	

Tabulka 1.2: *Vlnové délky CWDM dle standartu ITU-T G.692.2 [10]*

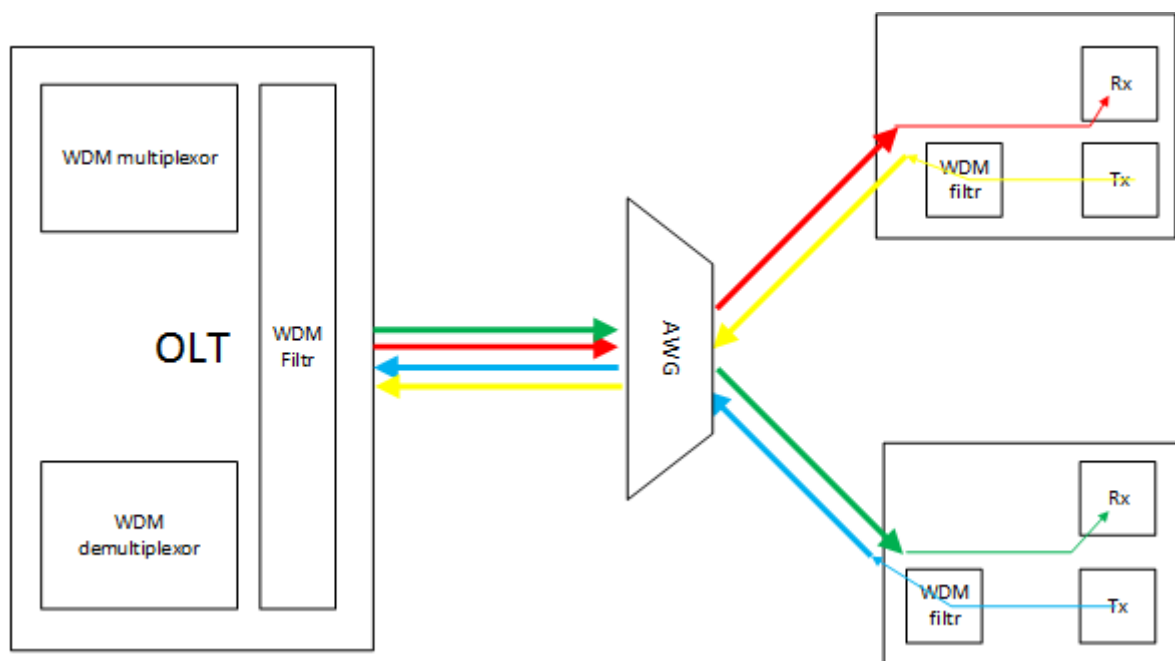
4.5 Realizace sítě WDM-PON

Prvním způsobem realizace WDM-PON sítě je využití klasického pasivního rozbočovače, neboli splitteru. Každá koncová jednotka ONU/ONT má pevně přidělenou vlnovou délku. Každé ONU obsahuje vlastní filtr, který vyfiltruje pouze jeho přidělenou vlnovou délku. Pro vzestupný směr mají jednotky přidělenou svou vlastní vlnovou délku a pro všesměrové vysílání je také určena jedna vlnová délka. Nevýhody tohoto řešení jsou jasné, plýtvání přenosové kapacity v optických kanálech, které nejsou v danou dobu aktivní či zcela využité. Je zde nutnost šifrování v sestupném směru, jelikož hrozí odposlech. Pasivní rozbočovač může mít negativní vliv na útlumovou bilanci, jelikož se zvyšujícím počtem rozdělení se zvyšuje útlum na rozbočovači.



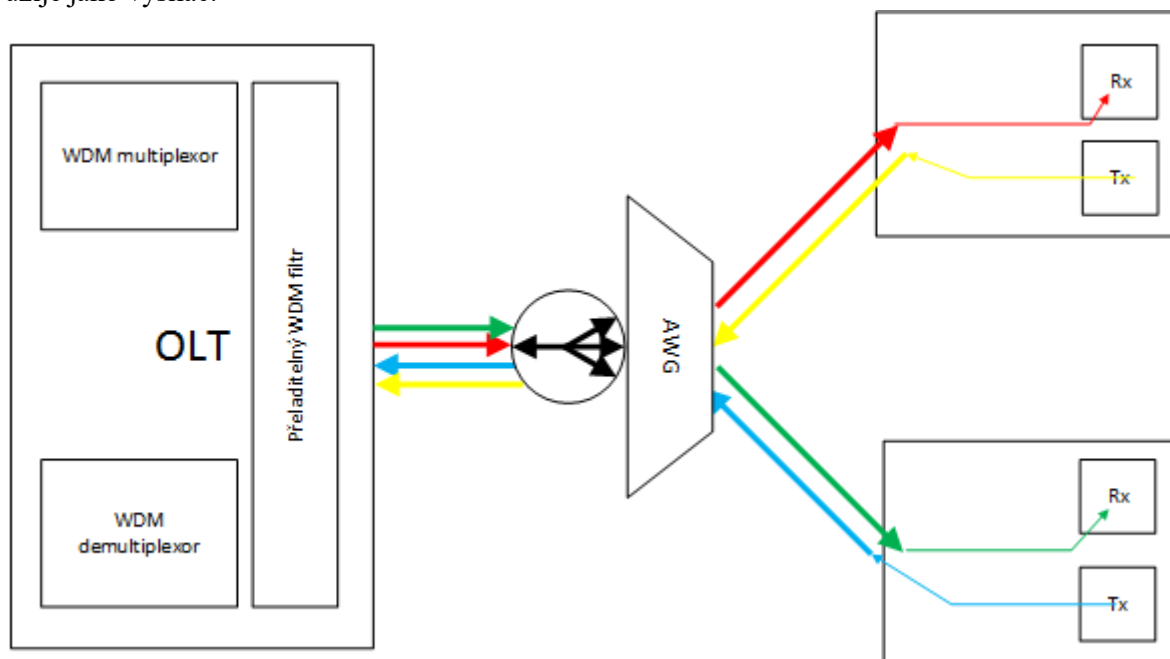
Obrázek 4.1: Realizace WDM-PON sítě s pasivním rozbočovačem

Další provedení pasivní optické sítě WDM-PON nahrazuje pasivní rozbočovač směrovou odbočnicí AWG. Směrová odbočnice AWG je schopna rozdělit jednotlivé vlnové délky do daného směru bez zvyšujícího vložného útlumu s přibývajícími vlnovými délkami. Také odpadá nutnost filtru v jednotkách ONU, jelikož ke každé jednotce přichází pouze daná vlnová délka. To má za následek další snižování vložného útlumu.



Obrázek 4.2: Realizace WDM-PON sítě s využitím směrové odbočnice AWG

Třetí možnost realizace WDM-PON sítě spočívá ve výměně koncových jednotek ONT a pasivního filtru za aktivní přeladitelný WDM filtr v jednotce OLT. V jednotkách ONT se využívá zavěšený FP laser, který se částečně chová jako optický zesilovač [12]. Laser pracuje na stimulační vlnové délce. Při průchodu signálu přes AWG se oddělí vlnová délka pro příchozí směr a dostane se k cílové ONT. Část paprsku projde skrz filtr na FP laser, na kterém dojde ke změně spektra a dále se využije jako vysílač.



Obrázek 4.3: Realizace WDM-PON sítě s využitím zavěšeného FP laseru

4.6 Aktivní PON

Aktivní PON síť můžeme definovat tak, že do čistě pasivní optické sítě PON vložíme aktivní prvky, jako jsou optické zesilovače. Tímto můžeme dosáhnout dvou cílů.

Prvním z nich je překlenutí větší vzdálenosti než klasické WDM-PON přístupové sítě. Překlenutelná vzdálenost se může počítat na stovky kilometrů, v závislosti na použitých zesilovačích, optických kanálech, fotodetektorech atd. Využívají se zde přenosové pásma C a L. V těchto pásmech mají jednovláknová optická vlákna zploštělou útlumovou charakteristiku (dá se říci, že mají konstantní měrný útlum) a dají se zde využít optické zesilovače typu EDFA.

Druhá možnost je zvýšení počtu uživatelů kde by bylo možno připojit až stovky uživatelů na jednu PON síť.

5 Prvky v síti WDM-PON

Použité prvky v sítích WDM-PON můžeme rozdělit jednoduše na aktivní, které vyžadují vlastní napájení a pasivní, které naopak nevyžadují žádné napájení. V této kapitole jednoduše popíšu jednotlivé prvky v síti a podrobněji se budu věnovat pouze optickým zesilovačům.

- Aktivní
 - Zdroje záření
 - Detektory optického záření
 - Optické zesilovače
- Pasivní
 - MULDEX
 - AWG
 - ROADM
 - Optický cirkulátor
 - Pasivní rozbočovač
 - Interleaver

5.1 Pasivní prvky

5.1.1 Pasivní rozbočovač

Jeden z důležitých prvků PON sítě je pasivní rozbočovač, neboli splitter. Základní funkcí je rozdělení signálu v sestupném směru, tedy od jednotky OLT ke koncovým jednotkám ONU/ONT, do x výstupu. Ve směru vzestupném (od koncových jednotek ONU/ONT k jednotce OLT) naopak slučuje signál do jednoho společného výstupu [1]. Se zvyšujícím se rozbočovacím poměrem roste i vložený útlum pasivního rozbočovače. Typický rozbočovací poměr bývá $1:X$ kde X nabývá hodnoty násobky dvou.

5.1.2 Optický Interleaver

Jde o zařízení, které slouží ke slučování dvou optických kanálů, lichého a sudého, do jednoho optického kanálu. Například dva optické kanály s rastrem 200Ghz jsou sloučeny do jednoho kanálu s rastrem 100Ghz [4].

5.1.3 Optický cirkulátor

Jde většinou o tříportové pasivní zařízení které slouží k oddělování jednotlivých směrů šíření v optickém vlákně. Využívá se většinou ve spojení s technologií DWDM. Optický signál se šíří od jednoho portu ke druhému pouze v jednom směru.

5.1.4 AWG

Pasivní směrová odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating) umožňuje pasivní vydělování optických kanálů v sestupném směru a naopak ve směru vzestupném slučuje optické kanály do jednoho výstupu.

5.1.5 ROADM

Tento prvek je laditelný optický multiplexor (Reconfigurable Optical ADD/DROP Multiplexer), který je schopný zařadit do volných kanálů v systému xWDM kanály z jiného směru (funkce ADD) či vyčlenit dané kanály ze systému (funkce DROP).

5.2 Aktivní prvky

5.2.1 Zdroje záření

Zdroj optického záření je jeden z nejdůležitějších prvků v optické síti. Zásadně ovlivňuje celkovou cenu optické trasy a především také výkonost systému. Na zdroje optického záření je kladen důraz na velikost, spolehlivost, dlouhou životnost a měl by být monochromatický. Zdroje můžeme rozdělit na koherentní a nekoherentní.

Za koherentní zdroje považujeme především polovodičové lasery DFB (Distributed FeedBack) či FP (Fabry-Perot). Tyto lasery se vyznačují vyšším výkonem a užší spektrální šířkou, ale je třeba teplotní stabilizace a vyšší napájení. Využívají se především na delší vzdálenosti a v xWDM systémech.

Za nekoherentní zdroje se považují LED (Light Emitting Diode) diody. Jejich výhody jsou v ceně a dlouhé životnosti, naopak nevýhodou je produkce širokého spektra. LED diody se používají při nižších přenosových rychlostech a často také na mnohavidových vláknech [15].

5.2.2 Detektory optického záření

Detektory optického záření jsou prvky optické sítě, kde dochází k detekci a poté k demodulaci přijímaného signálu. Také zde končí optické vrstvy, jelikož detektor přemění optický signál na elektrický. Nejčastěji používané fotodetektory v telekomunikacích jsou fotodiody PIN (Positive-Intrinsic-Negative) a lavinové fotodiody APD. Tyto diody musí splňovat různé parametry. Mezi ty nejdůležitější můžeme zařadit citlivost v daném pásmu, odezva, nezávislost na změnu teploty a napájení či vlastní šum.

- PIN - Nižší cena, rychlá odezva a spolehlivost
- APD - Větší citlivost než PIN, přesnější. Nevýhodou je větší proudová náročnost a tepelná citlivost.

5.3 Optické zesilovače

Optický signál přenášený pomocí optického vlákna po určité vzdálenosti ztrácí svou sílu a nemůže být detekován. Je to způsobeno útlumy na optické trase. Útlum způsobuje každý prvek v síti včetně samotného optického vlákna [14]. Z tohoto důvodu potřebujeme signál znovu zesílit. K tomu se dnes běžně využívají optické zesilovače.

Optický zesilovač je zařízení, které dokáže zesílovat optický signál v různých pásmech, avšak nedokáže signál vyčistit, ba naopak přidá i samotný šum způsobený většinou spontánní emisí ASE (Amplified Spontaneous Emission). Tento šum může být dále zesilován dalšími optickými zesilovači na přenosové trase a vede ke zvýšení bitové chybovosti (BER). Samotné zesílení je však mnohonásobně vyšší než šum. Pro vyčištění, či zesílení signálu se využívá tzv. regenerátorů, které

převádí optický signál zpět na elektrický, poté jej vyčistí, zesílí a znovu převede na optický signál (o-e-o regenerátor). Těmto regenerátorům se dále věnovat nebudu, jelikož nejsou součástí mé práce.

Optické zesilovače dokáží zesílit více vlnových délek najednou.

Možnosti využití optických zesilovačů [14][1]:

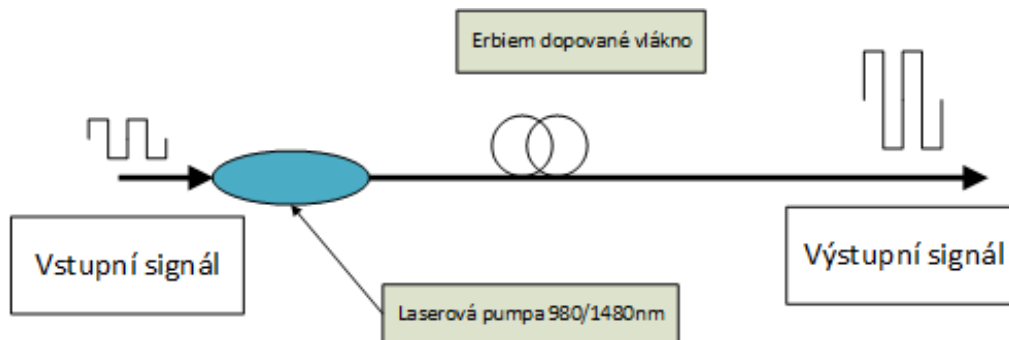
- In-line - umísťuje se průběžně do trasy, kde je třeba zvýšit úroveň signálu
- Předzesilovač - umísťuje se před detektor optického záření, kde je třeba zvýšit sílu signálu na minimální možnou pro detekci.
- Booster - umísťuje se ihned za optický zdroj záření a zvyšuje tak výstupní výkon
- Kompenzátor - umísťuje se před vazební členy v optické trase, jako jsou rozbočovače, kde je vysoký vložný útlum.

Základní vlastnosti zesilovačů můžeme popsat podle pěti základních parametrů:

- Zisk - Poměr vstupního a výstupního výkonu
- Šířka pásma zisku - Souhrn vlnových délek, na kterých je hodnota zisku větší nebo rovna polovině jeho maximální hodnoty. Preferujeme zesilovače s širokým pásmem a konstantním ziskem v jeho šířce.
- Saturační výkon - Schopnost přijmout velký vstupní výkon záření
- Šumové číslo - Poměr odstupu signálu od SNR
- Závislost na polarizaci - Některé zesilovače jsou citlivé na polarizaci vstupního výkonu. Polarizace se mění během šíření signálu.

5.3.1 EDFA

Mnoho systémů v dnešní době využívají zesilovače na bázi dopovaného vlákna s laserovou pumpou. Čerpané světlo z laserové pumpy má nejčastěji vlnovou délku 980nm nebo 1450nm. Nejčastější prvek se využívá erbium, kde samotné dopované vlákno má délku až několika desítek metrů. Toto vlákno je napojeno do optické trasy pomocí směrové odbočnice spolu s laserovou pumpou, jak lze vidět na obrázku č. 5.1. Díky laserové pumpě dochází v dopovaném vlákně k excitaci atomu erbia na vyšší energetické hladiny a dočasně tak uložíme energii z laserové pumpy. Při průchodu signálu přes toto dopované vlákno s uloženou energií dojde k jejímu uvolnění a způsobí stimulovanou emisi záření o stejné vlnové délce a fázi [14]. Ve vlákně však dochází i ke spontánní emisi, což je nežádoucí jev a způsobuje šum.



Obrázek 5.1: EDFA zesilovač

Tyto zesilovače vykazují největší zisk zesílení, ale dají se využít pouze v pásmech C a L. Zisk tohoto typu zesilovače může být až 50 dB [1]. Spektrum zisku bohužel není rovnoměrné. Při průchodu několika zesilovači mohou být velké rozdíly úrovní signálu mezi kanály.

5.3.2 Ramanovské zesilovače

Tento typ zesilovače je založen na principu Ramanova rozptylu. Samotné zesílení probíhá většinou na samotném optickém vlákne, které je v optické trase, tudíž nepřidáváme žádné další dopované vlákno jako v případě EDFA zesilovačů. Za Ramanův rozptyl je považována interakce mezi fotony s prostředím, ve kterém se nachází. Tímto způsobem se posunují pracovní vlnové délky.

Ramanův zesilovač vytváří stimulovaný Ramanův rozptyl, neboli SRS. Zesilovač dále využívá laserové pumpy, která je zde velmi důležitá a na jejím výběru stojí pracovní spektrum zesilovače. Za pomoci optického čerpání na dané vlnové délce dojde k interakci mezi fotony a fonony dané látky (tedy SiO_2), kde dojde k přičtení energie látky k energii fotonů. Vznikne optické záření, které je posunuto o 100nm k delším vlnovým délkám, tedy pro zesílení pásma 1550nm využijeme optické čerpání o vlnové délce 1450nm. Ramanův zesilovač tedy můžeme použít na libovolných vlnových délkách telekomunikačního pásma. Můžeme využít vícero zdrojů na optické trase, např. na začátku a konci optické trasy pro maximální zisk zesilovače. Také se zde využívá protisměrné čerpání, které zajistí menší šum na trase a tlumí ASE.

Podle umístění pumpy na trase rozlišujeme dva pracovní režimy zesilovačů. A to [15]:

- DRA (Distributed Raman Amplifier) Neboli rozprostřený ramanův zesilovač využívá zmíněných protisměrných pump a jsou průběžně kompenzovány ztráty na trase. Využívá se pro zvětšení dosahu optické trasy. Za nevýhodu můžeme považovat rozprostření celé infrastruktury zesilovače po celé délce trasy.
- LRA (Lumped Raman Amplifier) Takzvaný diskrétní Ramanův zesilovač je umístěn pouze v jednom bodě trasy a využívá se pro zvětšení přenosové kapacity vlákna.

5.3.3 Polovodičové zesilovače

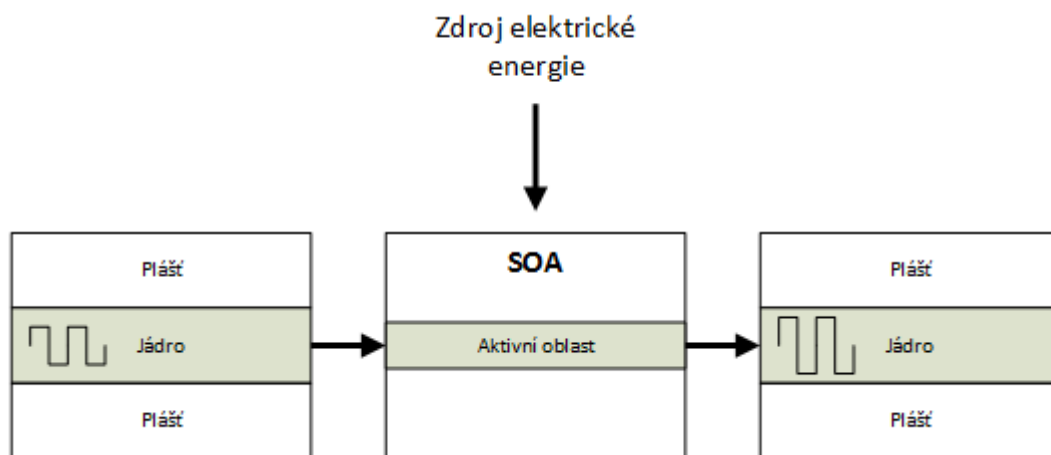
Polovodičové zesilovače (SOA) jdou s vývojem polovodičových laserů, jelikož jejich struktury jsou velice podobné. Zisk u těchto zesilovačů je generován v samotné struktuře polovodičového zesilovače, nikoliv v dopovaném či vlastním přenosovém vlákne jako je tomu u předešlých dvou typů optických zesilovačů. Další změnou je zde čerpání, kde u EDFA a Ramanovských zesilovačů byla použita laserová pumpa, zde je využita elektrická energie.

Ze zdroje elektrické energie jsou elektrony dosazeny na aktivní prostředí zesilovače. Elektrony poté zaujímají energetické stavy ve vodivostním pásmu a zanechávají díry ve valenčním pásmu. Zde mohou nastat tři situace.

- Stimulovaná absorpce - Dopadající foton může stimulovat elektron z valenčního pásma pro přechod do pásma vodivostního. Přitom je foton uhašen a jedná se o ztrátovou situaci.
- Stimulovaná emise - Foton o dostatečné energii způsobí rekombinaci elektronu a díry z valenčního pásma. Elektron uvolní energii ve formě fotonu se stejnými parametry (tedy frekvence, fáze a směr) jako původní foton dopadající na polovodič. Oba tyto fotony mohou dále stimulovat další přechody. Dochází zde k takzvané populační inverzi, kdy je počet elektronů ve vodivostním pásmu větší než ve valenčním pásmu. To je chtěný jev,

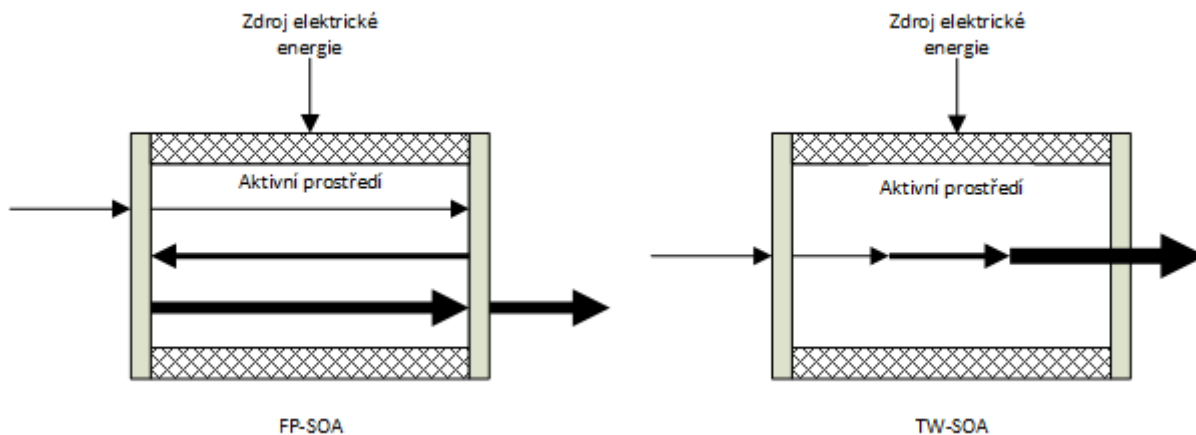
jelikož je poté větší pravděpodobnost pro vznik další stimulované emise. V tomto případě dochází k zisku.

- Spontánní emise - Dochází k samovolné rekombinaci elektronů, které uvolní energii ve formě fotonu s náhodnými parametry. Při tomto jevu vzniká šum a snižuje počet elektronů pro tvorbu zisku.



Obrázek 5.2: Ukázka SOA

Polovodičové zesilovače můžeme rozdělit na dva základní druhy a to na Fabry-Perotův zesilovač (FP-SOA) nebo TW-SOA (Travelling-wave SOA) [14]. FP zesilovač využívá odrazných ploch, kde signál prochází několikrát přes zesilovač. Tento typ zesilovače vykazuje vyšší zisk, ale má nejednotné spektrum zisku. TW zesilovačem prochází signál pouze jednou, tudíž vyžaduje antireflexní úpravu faset. Výhoda tohoto typu je, že dokáže zesílit celé spektrum [14].



Obrázek 5.3: Rozdíl mezi FP-SOA a TW-SOA

V následující tabulce jsem uvedl krátké srovnání všech představených zesilovačů.

Typ	SOA	EDFA	Ramanův
Získ (dB)	<30	>50	<40
Pásmo (nm)	1280-1650	1525-1575, 1560-1610	1280-1650
Šířka (nm)	60-80	30,00	10,00
Šumové číslo	5 až 8	4,00	4,00
Saturace	Ano	Ne	Ne
Polarizační závislost	Ano	Ne	Ano

Tabulka 1.3: *Srovnání zesilovačů*

6 Simulace v programu OptiSystem

V této kapitole se budeme věnovat především samotné simulaci v programu OptiSystem. Použili jsme zde dvě topologie WDM-PON sítě, které se od sebe liší v použitém vysílači. V jedné z topologií jsme využili laditelné Fabry Perotovy lasery a v topologii druhé komponentu *WDM transmitter*. Vysílací výkon OLT a ONU jednotek jsme nastavili podle změřené topologie v laboratoři EB316. Vycházíme tedy částečně z reálné sítě.

6.1 Nastavené parametry WDM-PON sítí

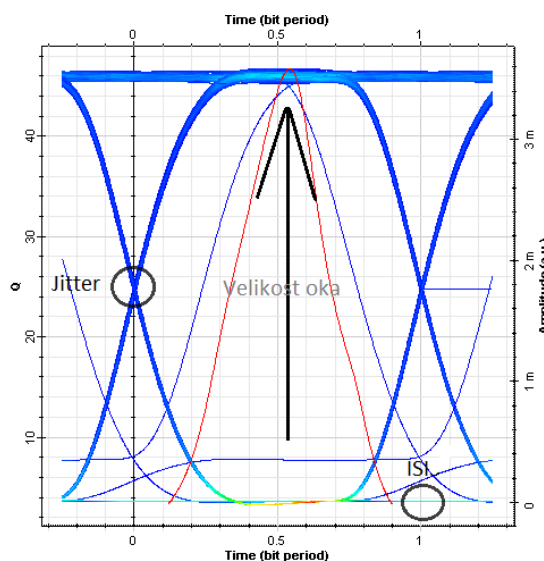
V naší WDM-PON síti využijeme dvě optické pásma. Pásmo L pro směr sestupný (downstream) a C pásmo pro směr vzestupný (upstream). Dále budou přítomny pouze 4 kanály v každém pásmu a to z důvodu rychlosti provedené simulace, samozřejmě je možné do daných topologií integrovat více kanálů. V L pásmu využijeme kanály o frekvenci 188,74 THz až 189,04 THz s odstupem jednotlivých kanálů 100 GHz (tedy 0,8 nm) a v C pásmu jsou to kanály 193,8 THz až 194,1 THz také s odstupem 100 GHz. Simulace budou probíhat při rychlostech 100 Mbit/s symetricky.

Naším úkolem bude nalézt maximální dosah sítě při použití EDFA zesilovače. Hlavní měřené parametry jsou chybovost, Q-faktor, přijímaný výkon signálu a odstup signálu od šumu.

6.2 Měřené parametry

6.2.1 Diagram oka

Sledované parametry u diagramu oka jsou především jeho velikost (rozevření oka), jitter a ISI (intersymbol interference). Velikost oka nám určuje rozeznatelnost logické 1 a 0, kdy hlavní parametr ovlivňující velikost je odstup signálu od šumu. Čím větší rozevření oka tím větší rozeznatelnost a kvalita signálu. Další parametr jitter nám udává zpoždění nebo odchylku signálu z jeho ideální pozice. ISI je způsobeno překrýváním jednotlivých modulačních impulsů. Na následujícím obrázku č. 6.1 je znázorněn ideální diagram oka s vyznačenými parametry.



Obrázek 6.1: Ideální diagram oka s vyznačenými parametry

6.2.2 Bitová chybovost

Bitová chybovost, neboli BER (Bit Error Rate), je jednoduše dána poměrem chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů. Lze ji vyjádřit vztahem:

$$BER = \frac{m_e}{v_i * t_m} [-; bit; b/s; s]$$

kde m_e je počet chybně přijatých bitů, v_i přenosová rychlost a t_m doba měření. Pro spolehlivou komunikaci je vyžadována co nejnižší hodnota BER, řádově ji lze vyjádřit takto:

- 10^{-3} (tj. 1 chyba z tisíce) je limit pro provoz linkových systémů PCM pro telefonii.
- 10^{-6} je hodnota, která se prakticky neprojeví na kvalitě přenášených hovorů, vyhovující i pro běžný přenos dat.
- 10^{-7} je limit pro provoz přípojek xDSL.
- 10^{-10} nebo 10^{-12} jsou hodnoty vyžadované pro optické linkové systémy.

6.2.3 Q-faktor

Q-faktor neboli také Quality faktor určuje kvalitu optického signálu. Tento parametr vychází ze statistických parametrů optického signálu a lze ho vyjádřit pomocí vzorce:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} [-]$$

kde μ_1 je střední hodnota vyhodnocených symbolů 1, μ_0 střední hodnota vyhodnocených symbolů 0, σ_1 rozptyl hodnot symbolů 1 a σ_0 je rozptyl hodnot symbolů 0. Z Q-faktoru lze vyčíst hodnotu odstupu optického signálu od šumu $OSNR = 20 \log Q$ a hodnotu BER. Q-faktor můžeme interpretovat jednoduše, čím vyšší je jeho hodnota, tím lepší je kvalita signálu.

6.2.4 Odstup optického signálu od šumu

Odstup optického signálu od šumu, neboli OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) je měřený parametr poměru výkonu signálu a výkonu šumu v optickém kanále. OSNR lze vypočítat podle vzorce:

$$OSNR = 10dB * \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$$

kde S reprezentuje výkon signálu a N výkon optického šumu.

OSNR je důležitý parametr zejména pro optické systémy využívající optické zesilovače, které do systému vnášejí ASE šum.

6.3 Použitý EDFA zesilovač

Nastavené parametry pro použitý zesilovač vychází z optického zesilovače WRA-217, který pracuje v C pásmu. V programu OptiSystem jsme vybrali součástku EDFA Black Box. Zde jsme měnili pouze parametr Gain a Noise. Zisk (Gain) jsme nastavili na 23 dB a šum (Noise) na 5 dB. Důležité parametry pro tento zesilovač jsou shrnuty v tabulce 1.4:

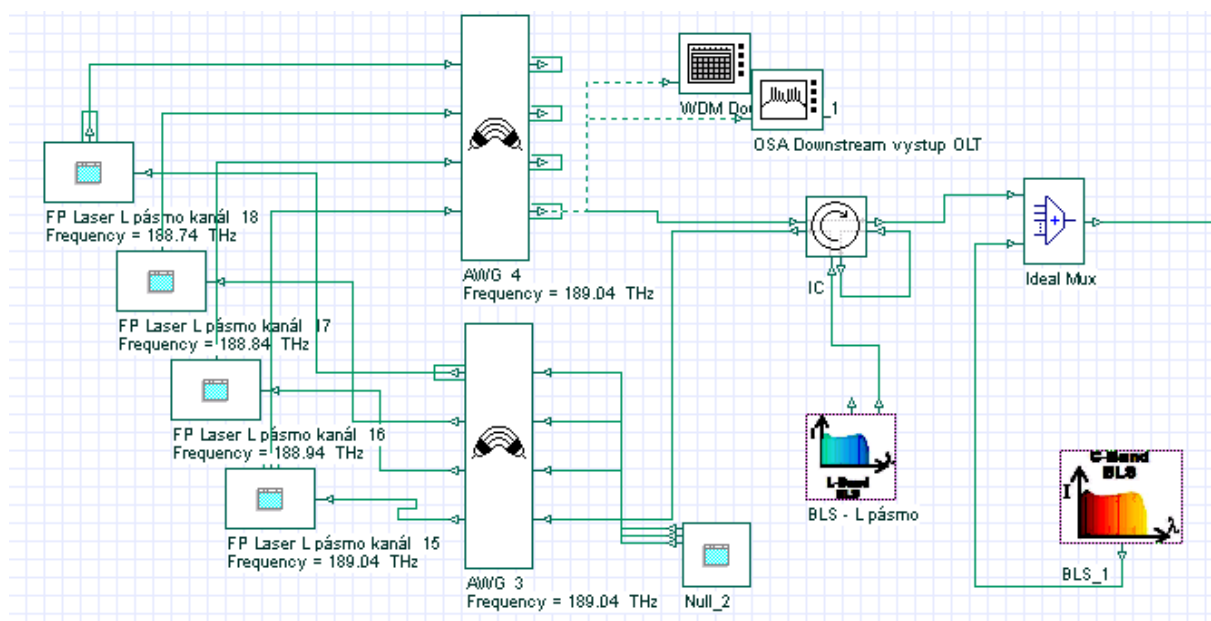
Parametr	Maximum	Minimum
Operační vlnové délky	1530	1563
Vstupní výkon	-29 dBm	4 dBm
Výstupní výkon	-6 dBm	17 dBm
Zisk	13 dB	23 dB
Šum	4 dB	6 dB

Tabulka 1.4: Parametry EDFA zesilovače WRA-217

6.4 Simulace s použitím FP laseru

6.4.1 OLT

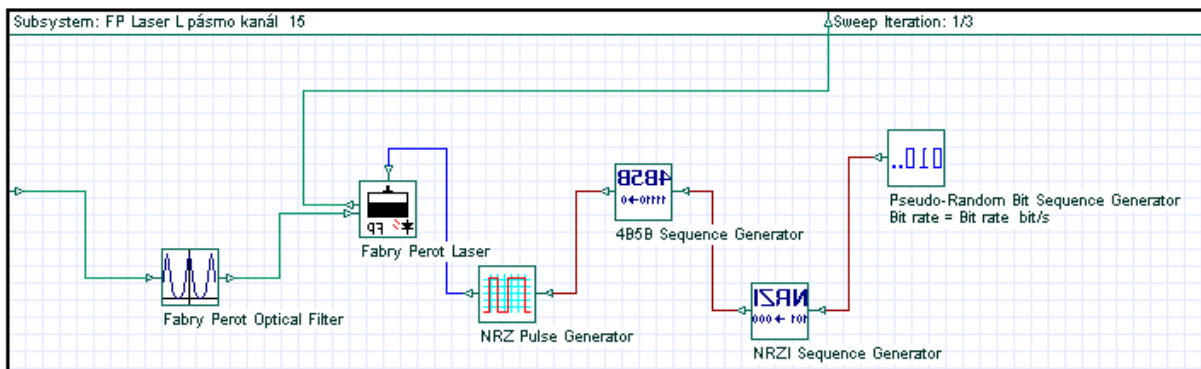
OLT jednotka se skládá ze dvou částí - přijímací a vysílací.



Obrázek 6.2: Vysílací část OLT jednotky

Jak lze z obrázku č. 6.2 vyčíst, vysílací část se skládá ze čtyř Fabry-Perotových laditelných laserů, dvou AWG splitterů, optického cirkulátoru a dvěma širokopásmovými zdroji pracujícími v L a C pásmu. Zdroj pro L pásmo je připojen do optického cirkulátoru a následně přiveden do AWG splitteru, který pracuje v režimu DEMUX, tedy rozdělí potřebné optické kanály na výstupní porty, na nepoužité vstupní porty je navedena optická nula. Dále je zde nastavena centrální frekvence 189,04 THz s odstupem -100 GHz. Z AWG splitteru jednotlivé kanály prochází přes laditelné Fabry-Perotovy

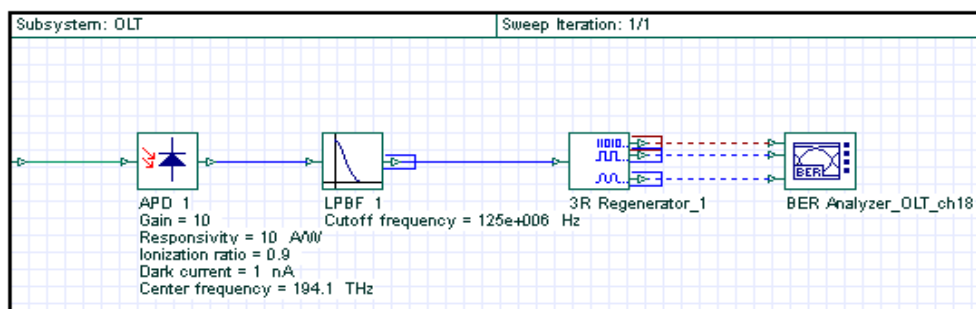
lasery. Ten se skládá ze samotného laseru, Fabry-Perotového optického filtru a modulační částí, kde máme generátor pseudonáhodných čísel, modulován pomocí NRZI s kódováním 4B5B.



Obrázek 6.3: *FP laser v OLT*

Signál dále pokračuje do dalšího *AWG splitteru* v režimu MUX s nastavenou centrální frekvencí 189,04 THz a odstupem -100 GHz, který optické kanály namultiplexuje do společného optického vlákna. Dále signál prochází přes optický cirkulátor a komponentu *Ideal MUX* přes kterou je připojený širokopásmový zdroj pro C pásmo, nutné k naladění vysílačů v ONU jednotkách.

Přijímací část OLT jednotky se skládá z fotodiody nastavené na daný optický kanál. Dále je zde dolní propust a 3R regenerátor pro obnovení tvaru signálu a jeho časovou základnu. Jako poslední je zde BER analyzátor, který dokáže vypočítat chybovost, Q-faktor a vykreslit diagram oka.

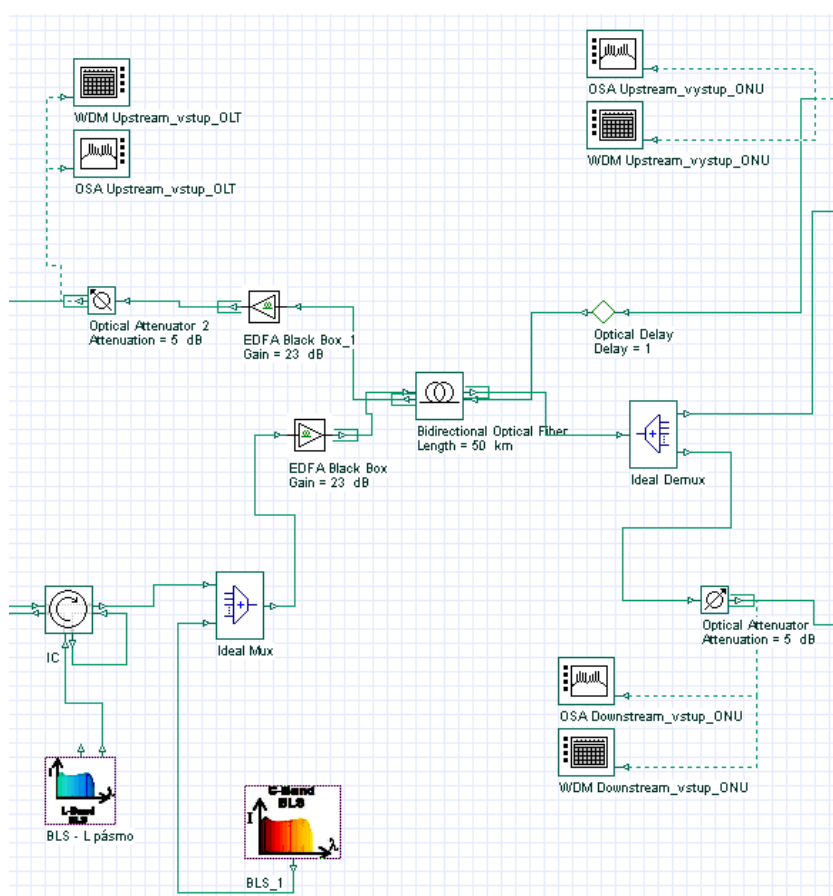


Obrázek 6.4: *Přijímací část OLT*

Před přijímací částí OLT jednotky se nachází *AWG splitter* v režimu DEMUX, který má za úkol demultiplexovat optické kanály. Centrální frekvence je nastavena na 194.1 THz s odstupem -100 GHz podle specifikace pro DWDM systémy. Na nepoužité vstupy jsou stejně jako u přijímací části přivedeny optické nuly.

6.4.2 ODN

V distribuční části topologie se nachází jednovidové optické vlákno odpovídající specifikaci G.652.C/D. Pro vlákno jsme použili komponentu *Bidirectional optical fiber*. Vložný útlum byl nastaven na 0,25 dB/km. Délku vlákna jsme měnili od 50 km do 125 km s krokem 25 km. Všechny ostatní parametry zůstaly v původním nastavení. Dále jsme vkládali do distribuční části EDFA zesilovač, který byl popsán v dřívější podkapitole. Pro každou délku vlákna jsme otestovali zesilovač ve třech módech, a to jako booster, předzesilovač a in-line zesilovač. V ODN můžeme vidět také komponentu *Optical delay*, kterou je nutno použít pro obousměrné testování. Při použití tohoto prvku je nutné v nastavení zvýšit i počet opakování simulace. Daná hodnota by měla odpovídat počtu nasazených prvků *optical delay* +1. Před přijímací částí ONU i OLT je také *optical attenuator* s hodnotou útlumu 5 dB. Tento útlumový článek je zde kvůli optickému analyzátoru, kde nám simuluje útlum na *AWG splitteru*. Na samotném *splitteru* je poté nastaven nulový útlum.

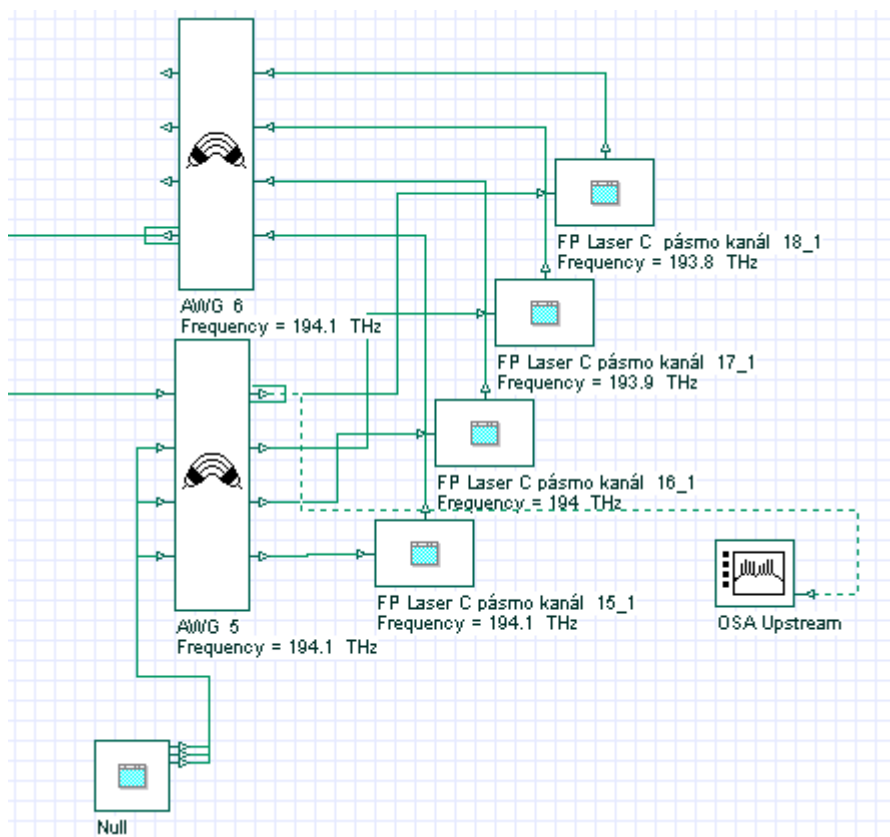


Obrázek 6.5: ODN s EDFA zesilovačem v režimu booster

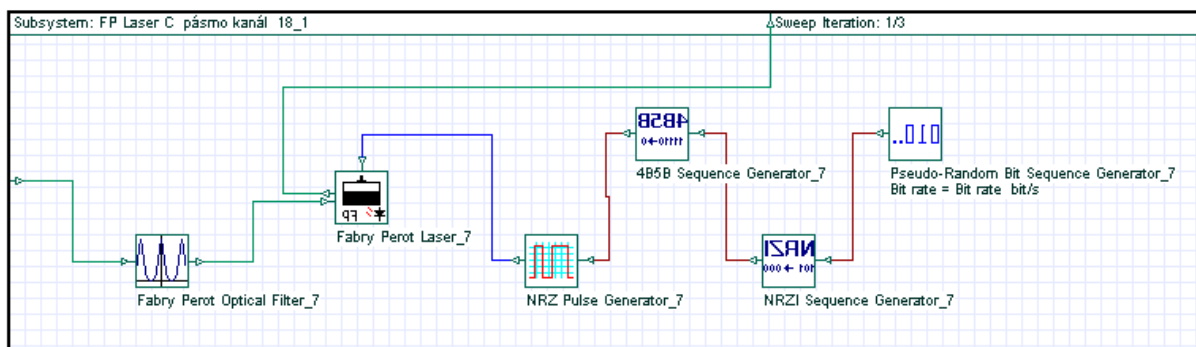
6.4.3 ONU

Stejně jako OLT jednotka se i ONU skládá ze dvou částí - přijímací a vysíací, ty jsou velice podobné těm v OLT. Skládá se ze čtyř FP laserů a dvou *AWG splitterů*. Ladící širokospektrální zdroj

byl obsažen v OLT jednotce. Signál ze zdroje je přiveden na *AWG splitter* v režimu DEMUX, centrální vlnová délka je nastavena na 194,1 THz s odstupem -100 GHz.



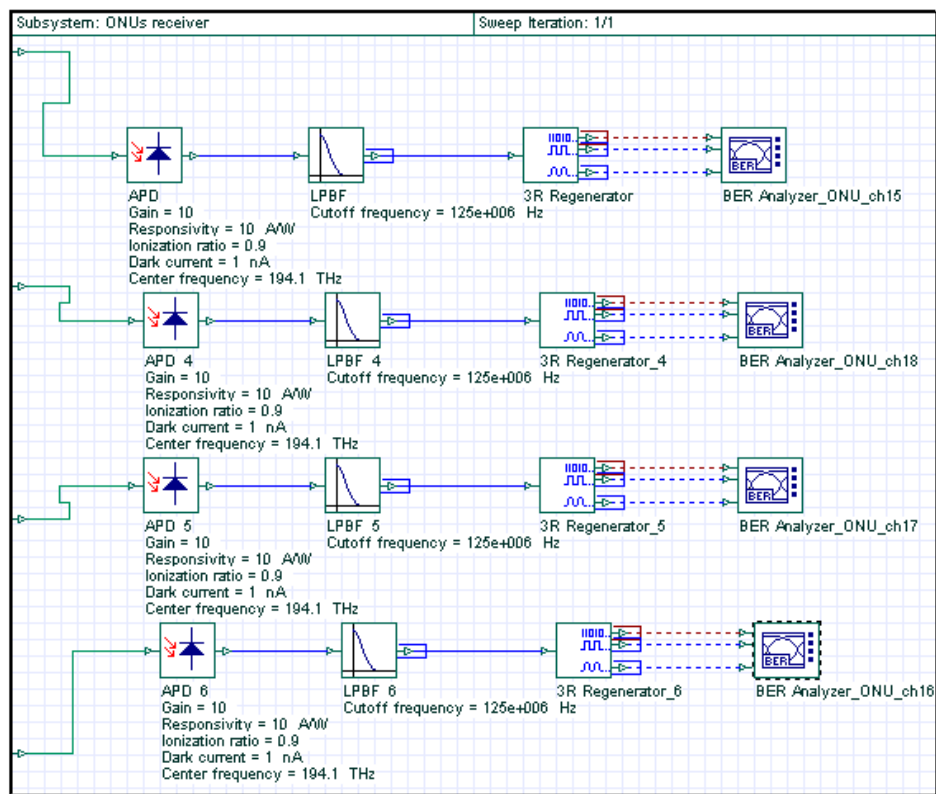
Obrázek 6.6: Vysílací část ONU jednotek



Obrázek 6.7: Fabry-Perotův laser v ONU

Signál dále prochází stejným *Fabry-Perotovým laserem* jako v případě OLT jednotky. Z laserů je přiveden na další *AWG splitter* v režimu MUX, který nám dané kanály namultiplexuje do společného optického vlákna.

Přijímací část je také stejná jako v případě OLT jednotek, liší se pouze v nastavených frekvencích na *AWG spllitteru*.



Obrázek 6.8: Příjímací část ONU

6.4.4 Výsledky

Jako první jsme udělali referenční měření pro 50 km bez zesilovače. Útlumy na komponentách byly nastaveny i pro následující všechna měření tak, aby vysílací výkon OLT jednotek byl přibližně -24 dBm a výkon na ONU jednotkách -26 dBm. Výsledky jsou shrnuty v tabulkách 1.5 a 1.6.

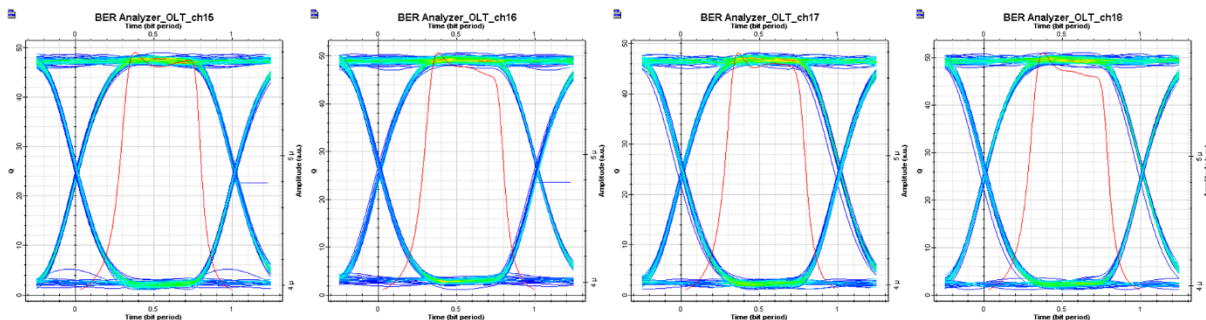
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	0	67.2222	0	49.0346
16. kanál	0	64.1848	0	50.6733
17. kanál	0	69.2448	0	48.2084
18. kanál	0	66.7607	0	51.0999

Tabulka 1.5: Chybovost a Q-faktor

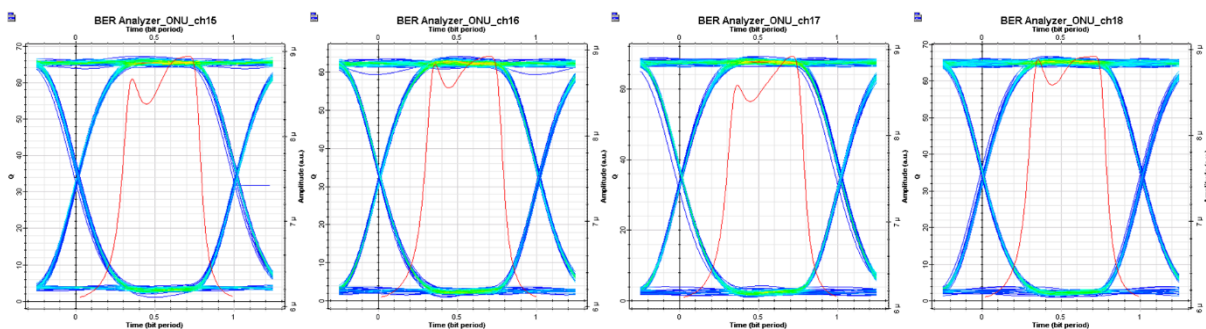
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-23.578791	-41.078791	40.685205	-25.4151	-42.990992	42.828595
16. kanál	-23.595371	-41.095371	41.062703	-25.4154	-42.990992	42.146767
17. kanál	-23.60367	-41.10367	42.315215	-25.45995	-42.932697	39.962861
18. kanál	-23.574979	-41.074979	41.825273	-25.456016	-43.007077	40.424407

Tabulka 1.6: Výkon signálu a OSNR

Jak lze z výsledků vidět, všechny hodnoty, krom výkonu na konci trasy jsou ve výborných hodnotách. To může být způsobeno nastavením samotných FP laserů a fotodiod v koncových jednotkách, které bylo konzultováno s odborníky z firmy Optiwave, tedy vydavatelem softwaru OptiSystem. Z důvodu výborných výsledků jsme se rozhodli provést další měření bez zesilovačů a zjistit, jakou vzdálenost dokážeme překlenout.



Obrázek 6.9: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.10: Diagram oka pro ONU jednotky

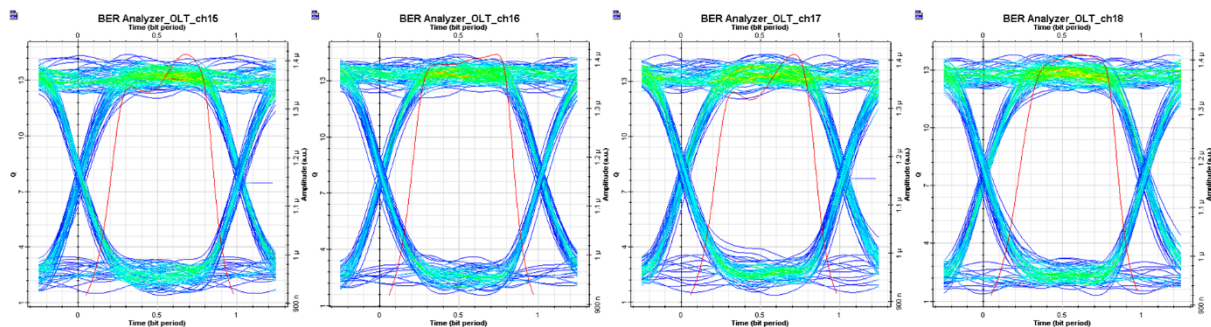
Při 75 km dlouhé optické trase již dochází ke zvýšené chybovosti, především u vzestupného směru, kde je výkon vysílací části menší. Stále ale nedochází k rozpadu spojení. OSNR je stále vysoké, proto zvýšenou chybovost přisuzujeme malému výkonu na konci trasy. Naměřené hodnoty jsou v tabulkách 1.7 a 1.8.

Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	6.75508e-083	19.2506	2.31798e-047	14.4048
16. kanál	7.64797e-101	21.2853	2.07609e-047	14.4112
17. kanál	1.96837e-081	19.0763	1.06329e-047	14.4592
18. kanál	1.37721e-094	20.5996	9.15367e-044	13.8226

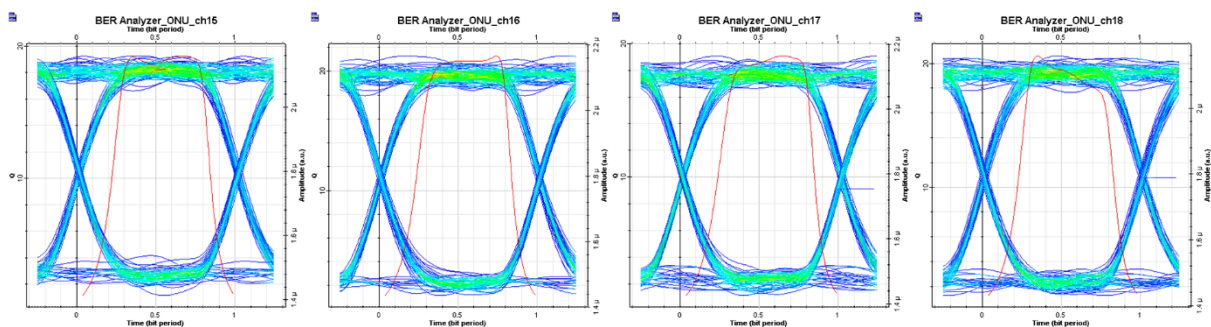
Tabulka 1.7: Chybovost a Q-faktor při 75 km

Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-23.578359	-47.328359	40.726585	-25.463168	-49.222916	40.73918
16. kanál	-23.603706	-47.353706	39.830183	-25.433703	-49.222916	41.997248
17. kanál	-23.547915	-47.297915	40.599122	-25.48897	-49.165186	40.588752
18. kanál	-23.557108	-47.307108	41.640102	-25.428217	-49.201583	39.678369

Tabulka 1.8: Výkon signálu a OSNR při 75 km



Obrázek 6.11: Diagram oka pro OLT jednotky při 75 km



Obrázek 6.12: Diagram oka pro ONU jednotky při 75km

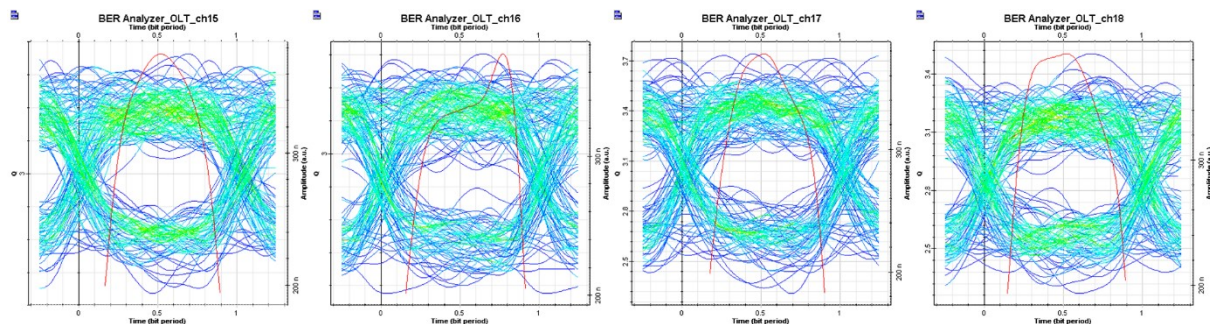
U optické trasy délky 100 km dochází k rozpadu spojení ve směru vzestupném. Znovu zde máme velký odstup signálu od šumu, ale výkon je již degradován na velice nízkou úroveň.

Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	1.97216e-008	5.48889	9.5634e-005	3.72472
16. kanál	1.46973e-009	5.93108	0.000151349	3.60667
17. kanál	3.68752e-008	5.37839	8.85217e-005	3.74073
18. kanál	1.39856e-008	5.54134	0.000226021	3.50259

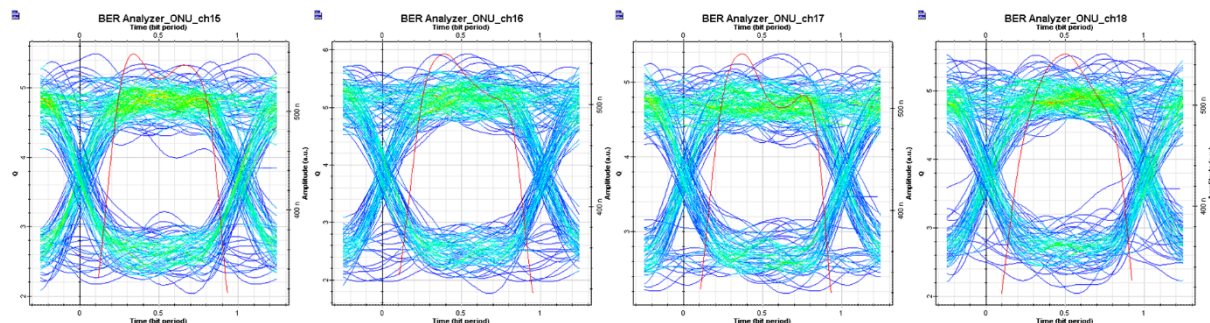
Tabulka 1.9: Chybovost a Q-faktor při 100 km

Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-23.541237	-53.541237	42.33563	-25.509875	-55.445115	42.019344
16. kanál	-23.556834	-53.556834	41.271843	-25.424544	-55.445115	43.613601
17. kanál	-23.556889	-53.556889	41.657094	-25.487731	-55.43343	42.029133
18. kanál	-23.573913	-53.573913	42.798299	-25.465876	-55.460456	40.83133

Tabulka 1.10: Výkon signálu a OSNR



Obrázek 6.13: Diagram oka pro OLT při 100 km



Obrázek 6.14: Diagram oka pro ONU při 100 km

6.4.5 Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako předzesilovač

6.4.5.1 Délka trasy 50km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 50 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.11 a 1.12.

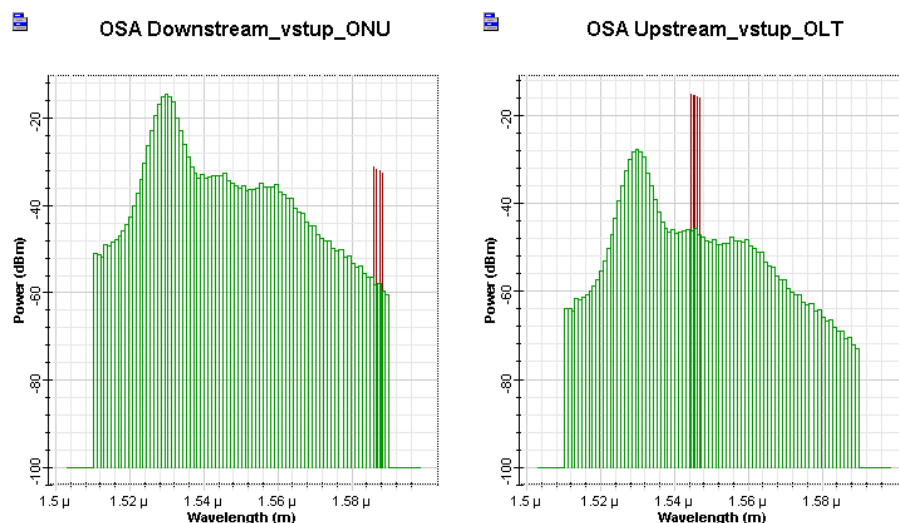
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	3.35665e-044	13.8948	3.73754e-151	26.1602
16. kanál	1.34348e-055	15.6635	2.52747e-174	28.1233
17. kanál	6.65261e-041	13.3392	4.26221e-128	24.0477
18. kanál	1.5744e-078	18.7234	1.22765e-131	24.3846

Tabulka 1.11: Chybovost a Q-faktor

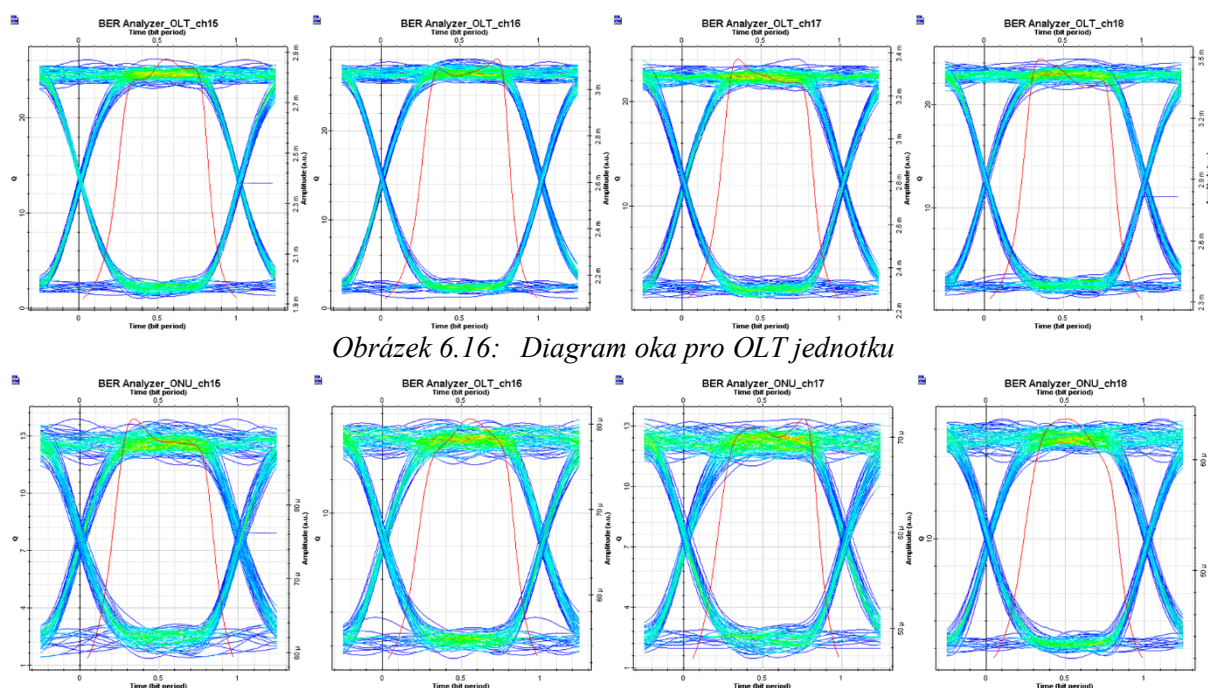
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-23.531403	-32.594823	20.786822	-25.444206	-16.038252	25.845448
16. kanál	-23.530019	-32.095177	21.41249	-25.452051	-16.038252	25.625743
17. kanál	-23.58481	-31.64596	20.993356	-25.432601	-15.665199	25.329209
18. kanál	-23.575259	-31.108693	21.426893	-25.437292	-15.379022	26.002113

Tabulka 1.12: Výkon signálu a OSNR

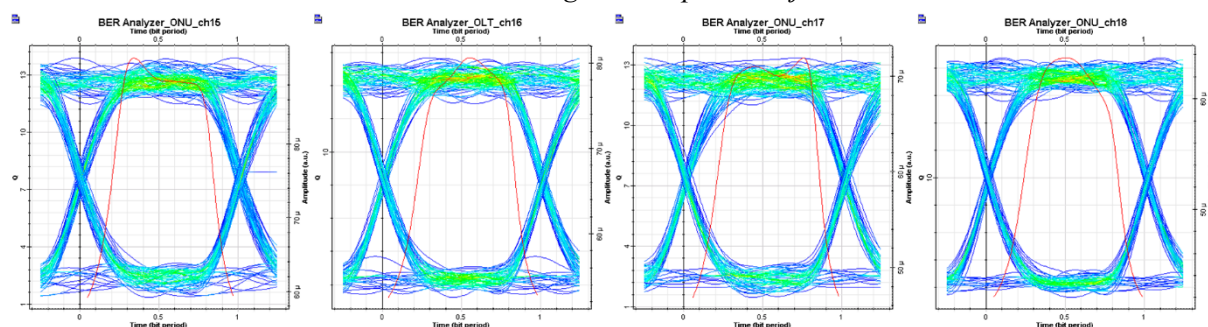
Při porovnání s referenčním měřením při 50 km vidíme značně horší výsledky. Bližší pohled do tabulek nám prozradí, že ačkoli se nám zvýšil výkon optických kanálů, snížilo se nám OSNR. Je to způsobeno ASE šumem zesilovače, který k tomu zesiluje i šum způsobený samotným vysílačem. Rozdíl v OSNR mezi referenčním měřením a s použitím EDFA zesilovače je kolem 20 dB pro sestupný směr, respektive 15 dB pro směr vzestupný. Od toho se nám odvíjí i horší diagramy oka pro ONU i OLT.



Obrázek 6.15: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



Obrázek 6.16: Diagram oka pro OLT jednotku



Obrázek 6.17: Diagram oka pro Onu jednotku

6.4.5.2 Délka trasy 75km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 75 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.13 a 1.14.

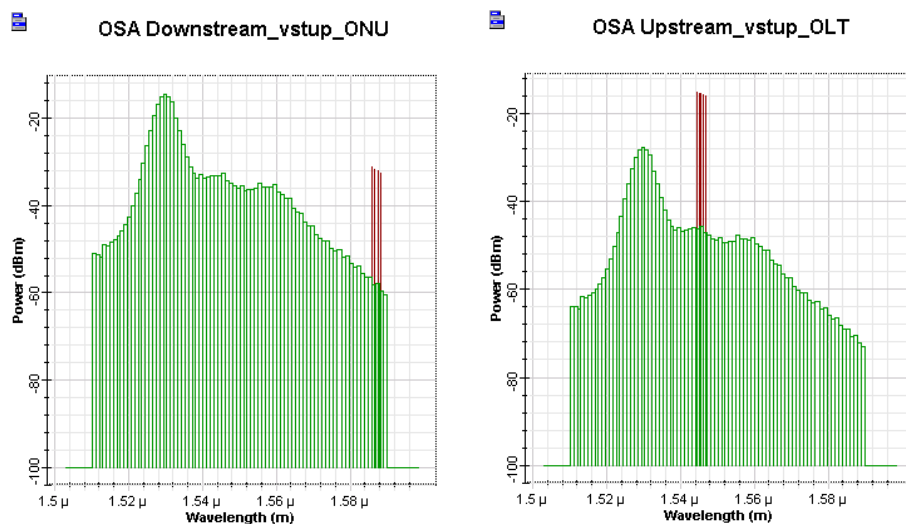
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	1.83673e-009	5.89774	1.62996e-144	25.5703
16. kanál	3.01507e-013	7.19635	3.45713e-171	27.8658
17. kanál	1.11856e-010	6.344	3.19941e-145	25.6335
18. kanál	1.67759e-018	8.69827	4.97764e-131	24.3278

Tabulka 1.13: Chybovost a Q-faktor

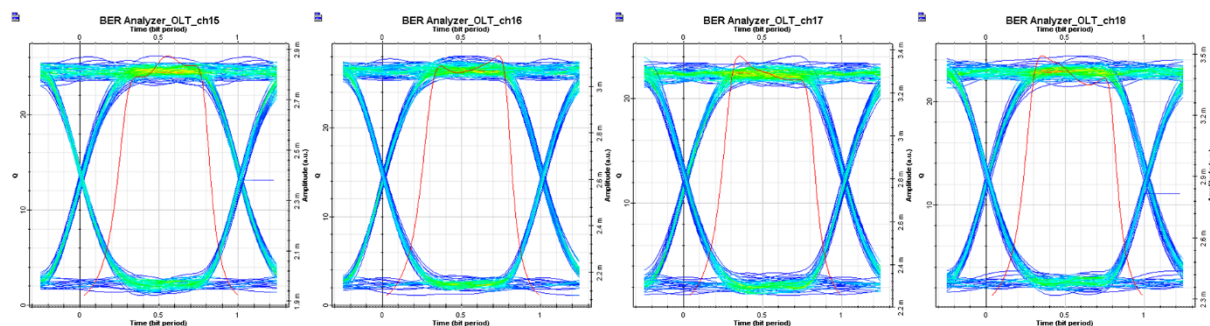
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-23.550833	-38.875037	14.503675	-25.436423	-22.301437	25.899231
16. kanál	-23.584761	-38.405215	15.13631	-25.498629	-22.301437	25.641601
17. kanál	-23.556614	-37.870837	14.839058	-25.414382	-21.94801	25.323447
18. kanál	-23.547249	-37.322902	15.250851	-25.447433	-21.651958	26.00418

Tabulka 1.14: Výkon signálu a OSNR

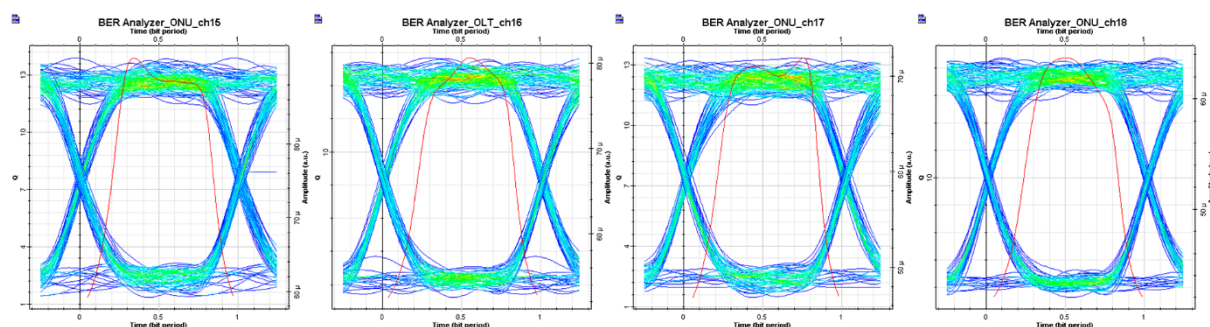
U optické trasy délky 75 km vidíme další nárůst chybovosti, ale pouze ve směru sestupném. Tyto hodnoty se dají brát již jako hraniční pro optickou komunikaci. Je nutné si všimnout, že OSNR a s ním i chybovost u vzestupného směru se nám mění minimálně.



Obrázek 6.18: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



Obrázek 6.19: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.20: Diagram oka pro ONU jednotky

6.4.5.3 Délka trasy 100 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 100 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.15 a 1.16.

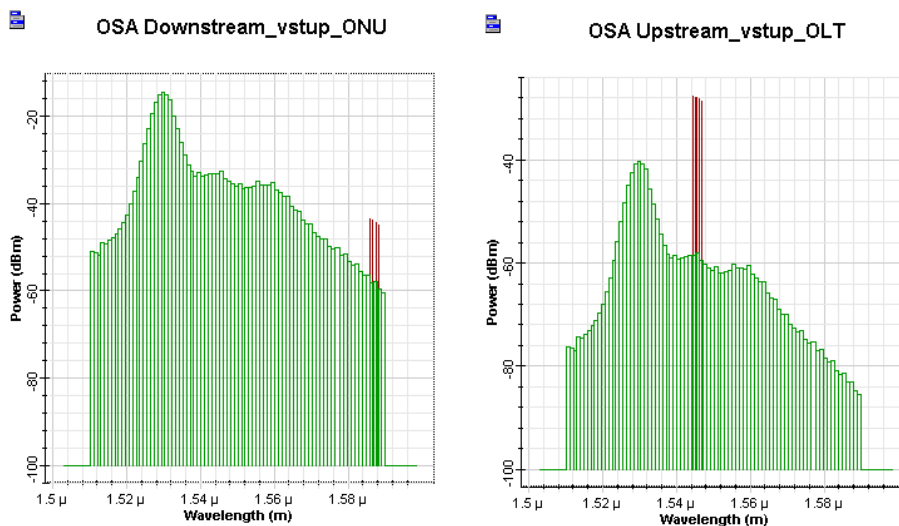
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	0.00101869	3.0842	8.68965e-154	26.3906
16. kanál	0.00056135	3.25249	8.68965e-154	26.3906
17. kanál	0.00031578	3.41278	8.87306e-118	23.0416
18. kanál	5.81196e-005	3.85166	8.20192e-148	25.8651

Tabulka 1.15: Chybovost a Q-faktor

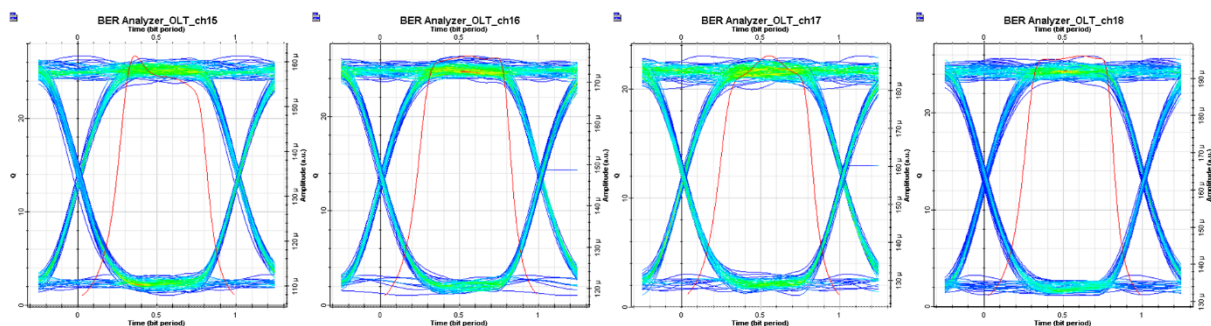
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-23.550596	-45.169915	8.1381253	-25.43488	-28.587227	25.749596
16. kanál	-23.511457	-44.553393	8.9461169	-25.433336	-28.587227	25.710573
17. kanál	-23.547288	-44.104324	8.6221076	-25.460812	-28.134885	25.510816
18. kanál	-23.6029	-43.577785	8.9861356	-25.456015	-27.830559	26.037261

Tabulka 1.16: Výkon signálu a OSNR

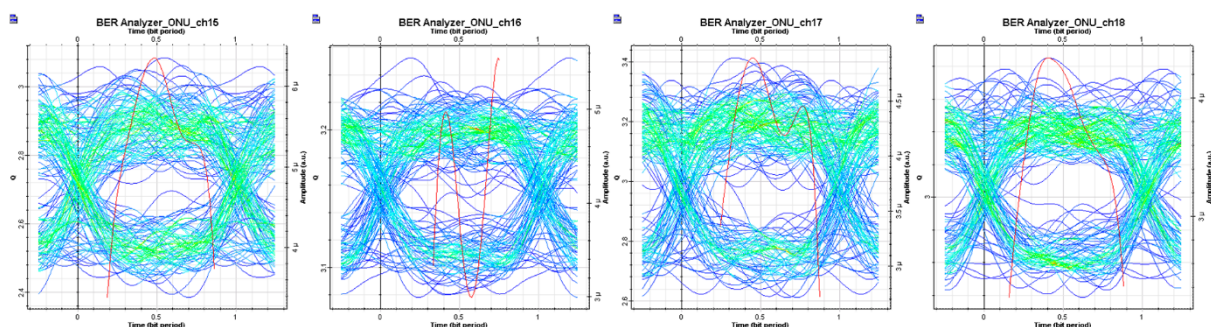
Po trase o délce 100 km dochází k rozpadu spojení. Chybovost v sestupném směru je příliš vysoká, znovu zde došlo k velkému poklesu výkonu signálu, a s ním spojeným parametrem OSNR, odstupu signálu (červená barva) od šumu (zelená barva) lze vidět na optickém spektru na obrázku 6.21. Znovu ale vidíme minimální rozdíly ve směru vzestupném. Dá se tedy předpokládat, že v tomto směru bychom dosáhli větší překlenuté vzdálenosti.



Obrázek 6.21: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



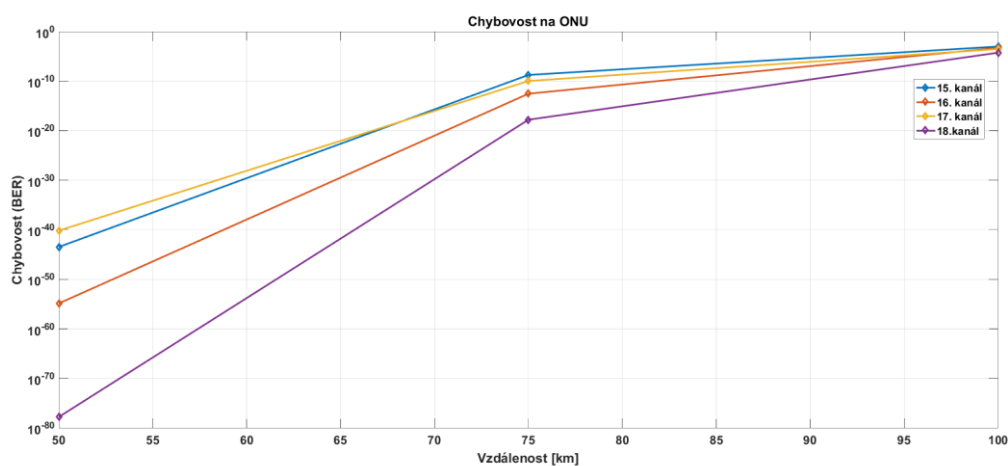
Obrázek 6.22: Diagram oka pro OLT jednotky



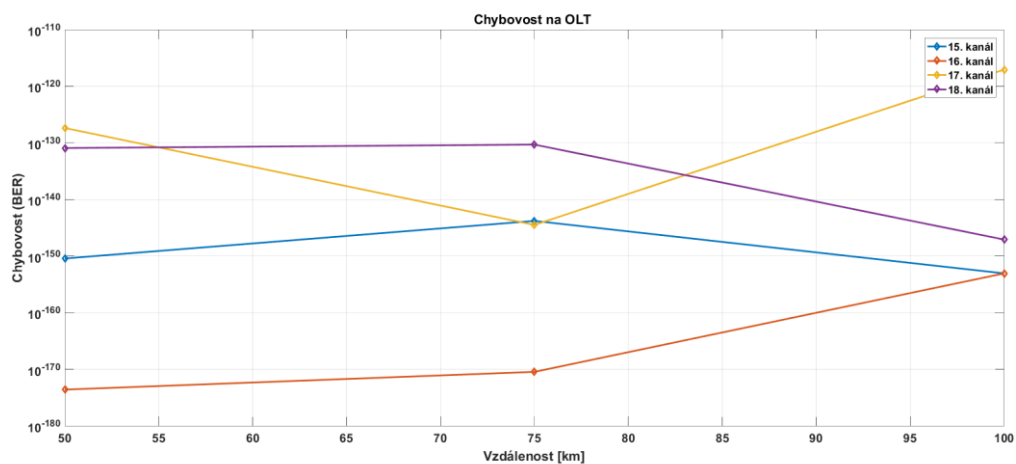
Obrázek 6.23: Diagram oka pro ONU jednotky

6.4.5.4 Grafické znázornění

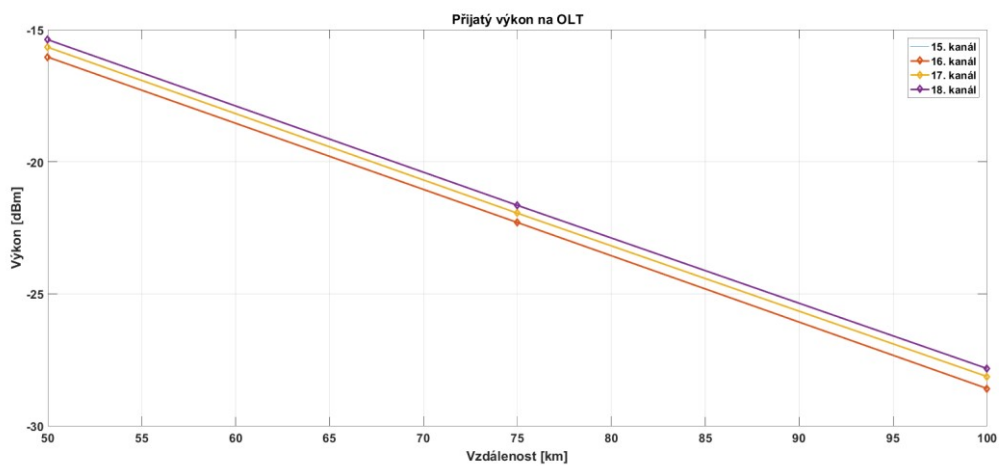
V následujících grafech na obrázcích 6.24 - 6.27 jsou znázorněny chybovosti a výkony signálů všech měřených situací. Dosáhli jsme zde stejnou překlenutou vzdálenost jako bez použití zesilovače, zřejmě je to způsobeno nastavením na fotodiodách, které jsme, jak jsme již zmínili, nastavili na dle odborníků z firmy Optiwave.



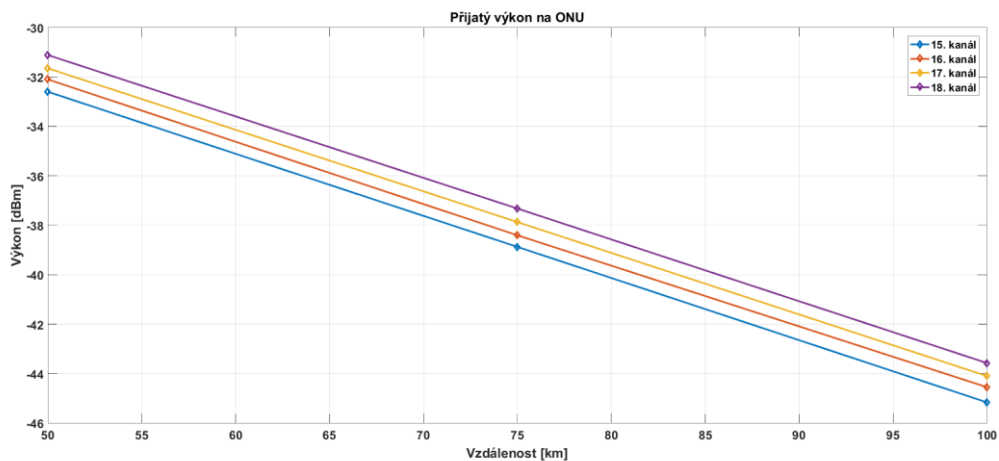
Obrázek 6.24: Chybovost na straně ONU



Obrázek 6.25: Chybovost na straně OLT



Obrázek 6.26: Výkon na straně OLT



Obrázek 6.27: Výkon na straně ONU

6.4.6 Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako booster

6.4.6.1 Délka trasy 50 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 50 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.17 a 1.18.

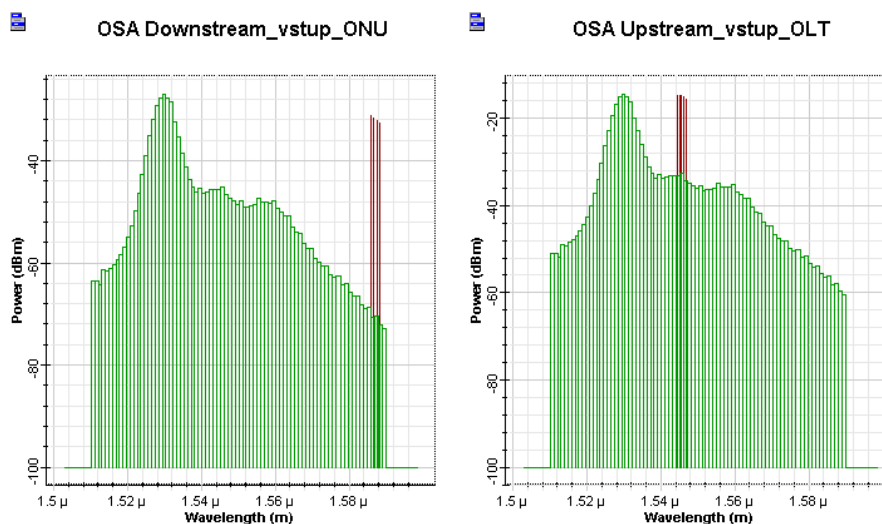
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	0	52.1516	3.55583e-010	6.16337
16. kanál	0	64.6447	4.27613e-011	6.48891
17. kanál	0	63.0707	6.28789e-008	5.27992
18. kanál	0	65.7385	8.61337e-011	6.38041

Tabulka 1.17: Chybovost a Q-faktor

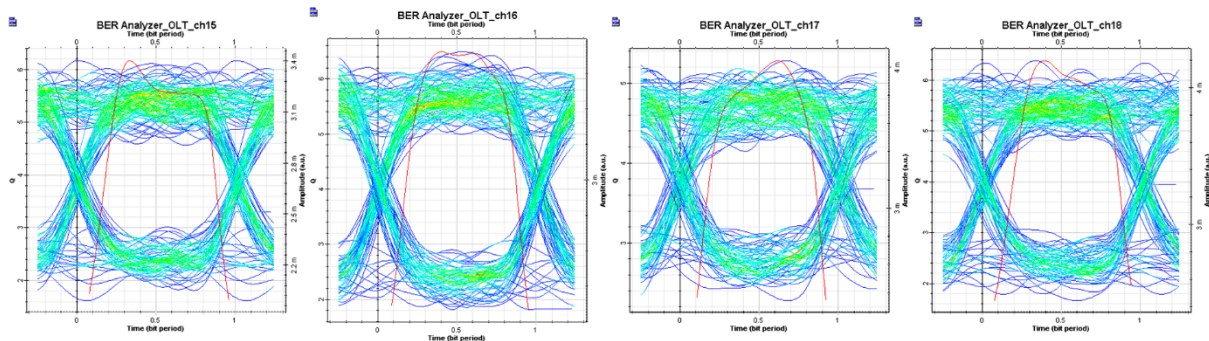
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-23.58784	-32.650134	32.737998	-25.43599	-15.655687	13.514116
16. kanál	-23.547458	-32.118967	33.521004	-25.42348	-15.655687	13.29588
17. kanál	-23.57526	-31.631115	33.241624	-25.451272	-15.280798	12.993858
18. kanál	-23.57435	-31.107325	33.554369	-25.456313	-14.969434	13.680838

Tabulka 1.18: Výkon signálu a OSNR

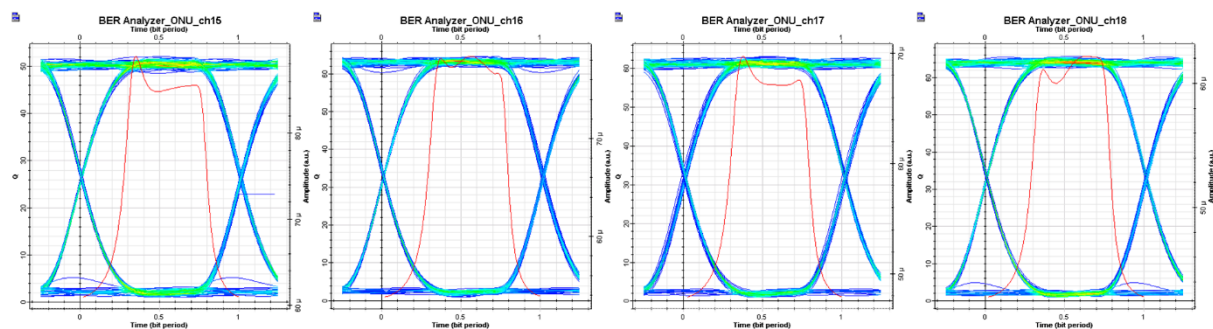
Při nasazení zesilovače jako booster, tedy na začátek trasy, jsou hodnoty pro směr sestupný výborné, chybovost je nulová, Q-faktor velký a odstup od šumu také. Na druhé straně, ve vzestupném směru máme již při této délce optické trasy chybovost, kterou můžeme považovat za hraniční pro optickou komunikaci. Zesílení probíhá před OLT jednotkou a zesiluje i veškerý šum, proto zde máme menší odstup signálu od šumu a s ním spojenou chybovost.



Obrázek 6.28: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



Obrázek 6.29: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.30: Diagram oka pro ONU jednotky

6.4.6.2 Délka trasy 75 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 75 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.19 a 1.20.

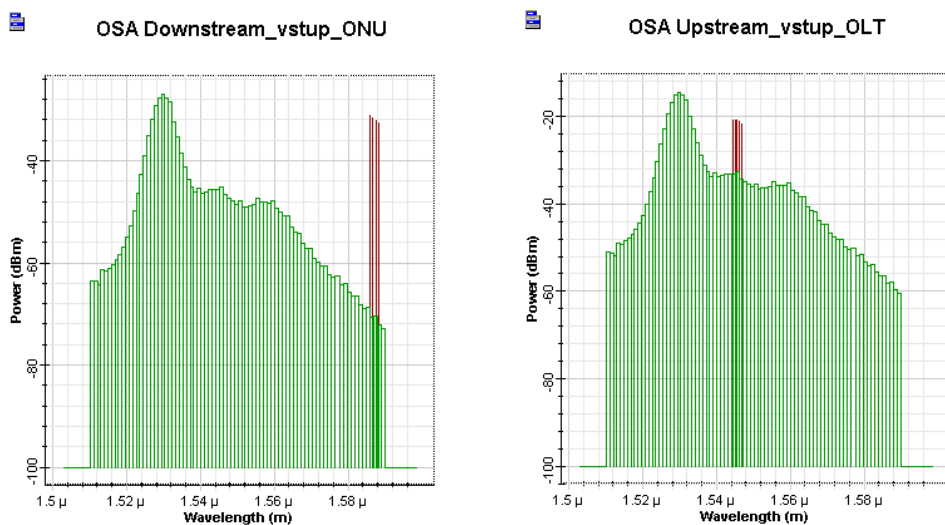
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	0	47.1679	0.00158422	2.95071
16. kanál	0	55.8073	0.00202324	2.86905
17. kanál	0	53.0573	1	0
18. kanál	0	58.3788	0.00372633	2.67124

Tabulka 1.19: Chybovost a Q-faktor

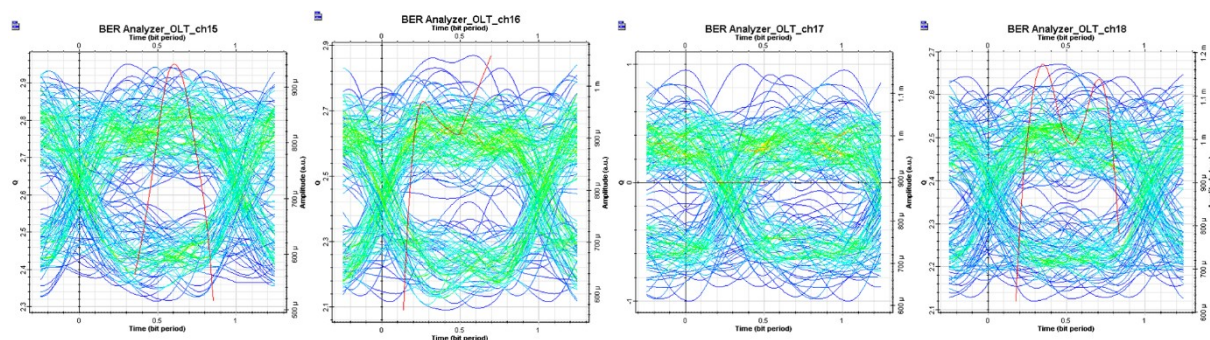
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU (dB)	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT (dB)
15. kanál	-23.577617	-38.890747	32.728885	-25.491604	-21.895735	7.2118274
16. kanál	-23.566008	-38.386924	33.164032	-25.460931	-21.895735	6.9819875
17. kanál	-23.52915	-37.836957	33.019323	-25.450931	-21.533794	6.7107419
18. kanál	-23.5941	-37.377352	33.536004	-25.429401	-21.201169	7.368528

Tabulka 1.20: Výkon signálu a OSNR

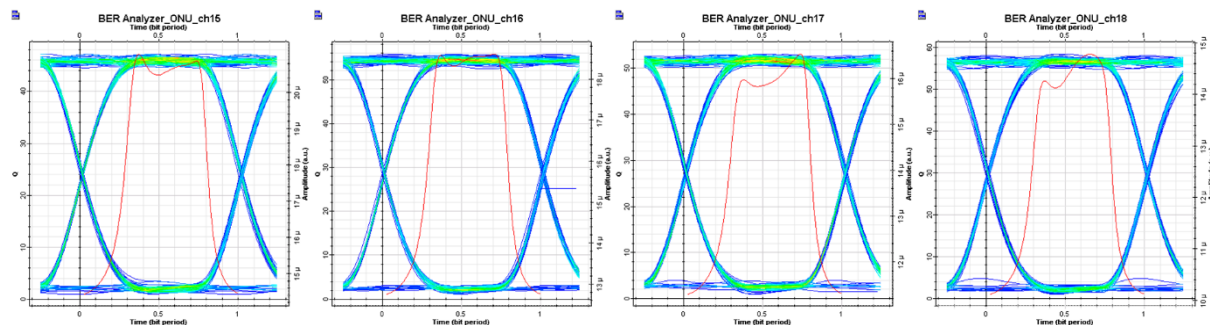
Navýšení optické trasy znamenalo rozpad spojení ve vzestupném směru. Situace se opakuje jako v předešlém měření, tedy u sestupného směru máme nulovou chybovost, zatímco u vzestupného je chybovost obrovská, je to způsobeno OSNR.



Obrázek 6.31: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



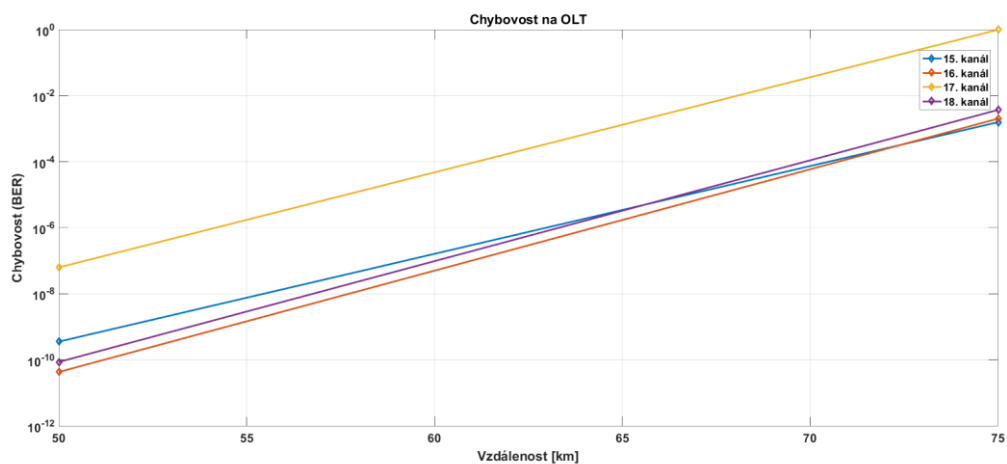
Obrázek 6.32: Diagram oka pro OLT jednotky



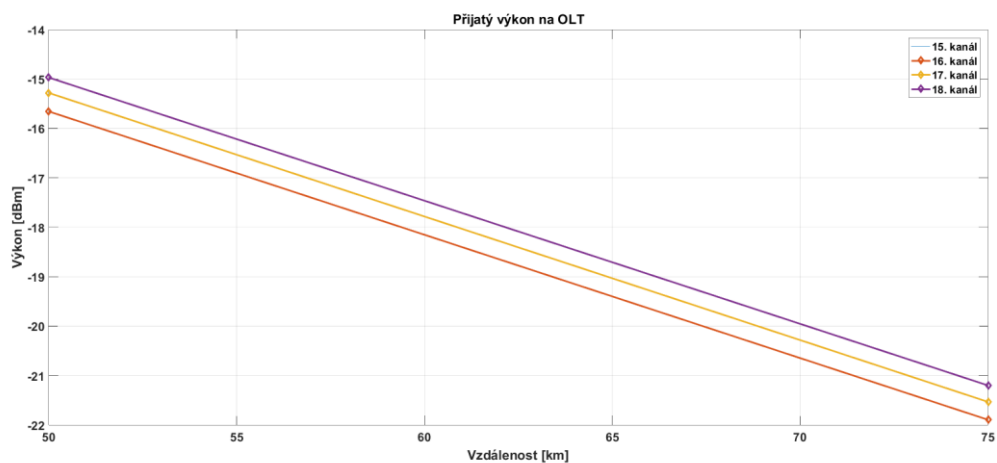
Obrázek 6.33: Diagram oka pro ONU jednotku

6.4.6.3 Grafické znázornění

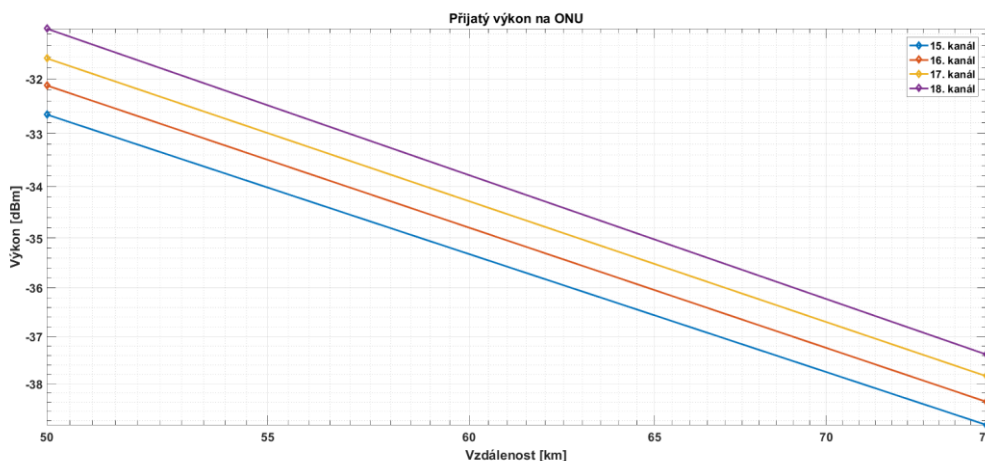
V grafech 6.34 - 6.36 jsou znázorněny chybovosti a výkony signálů všech měřených situací. Oproti referenčnímu měření jsme zde dosáhli podstatně menší vzdálenosti. Je to způsobeno nastavením na fotodiodách, které jsme nastavili na dle odborníků z firmy Optiwave. Výsledky jsou ovlivněné také kvůli velmi nízkému OSNR, kde zesilovač zesiluje šum.



Obrázek 6.34: Chybovost na OLT



Obrázek 6.35: Výkon na OLT



Obrázek 6.36: Výkon na ONU

6.4.7 Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako in-line zesilovač

6.4.7.1 Délka trasy 50 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 50km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.21 a 1.22.

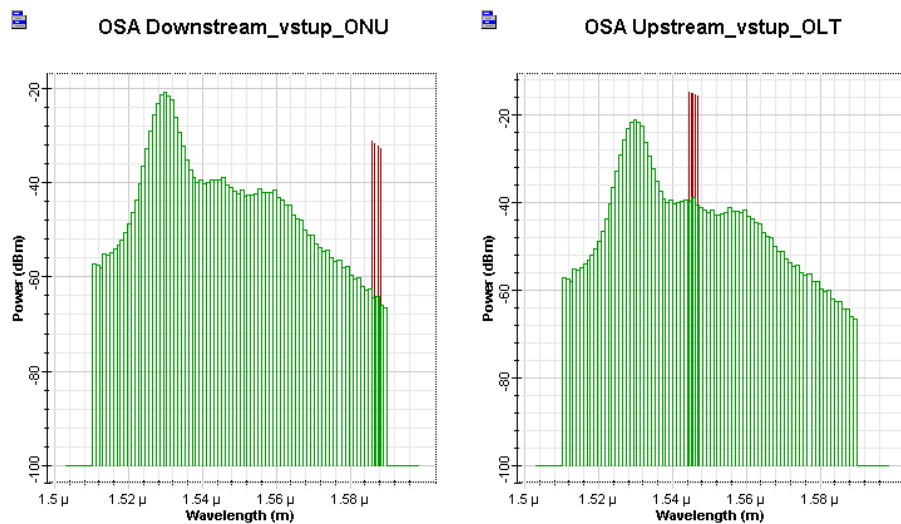
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	8.63692e-176	28.2431	2.3357e-036	12.61154
16. kanál	1.74592e-210	30.9396	2.07894e-041	13.4275
17. kanál	1.26e-196	29.8917	5.10474e-029	11.1179
18. kanál	1.9483e-222	31.8154	6.59344e-037	12,63451

Tabulka 1.21: Chybovost a Q-faktor

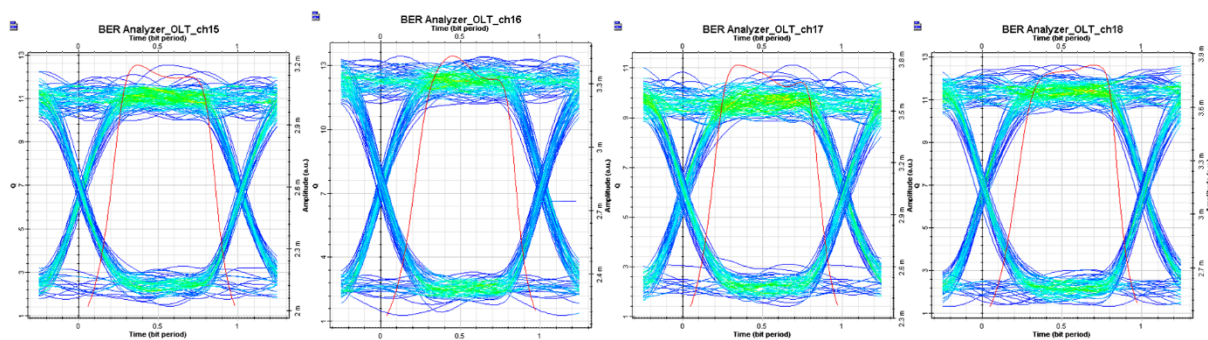
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU (dB)	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT (dB)
15. kanál	-23.569279	-32.631093	26.815236	-25.426877	-15.729179	19.70733
16. kanál	-23.593943	-32.160346	27.517628	-25.480582	-15.729179	19.51092
17. kanál	-23.59413	-31.649947	27.182331	-25.405319	-15.375603	19.282391
18. kanál	-23.566528	-31.100226	27.54017	-25.457139	-15.039979	19.880363

Tabulka 1.22: Výkon signálu a OSNR

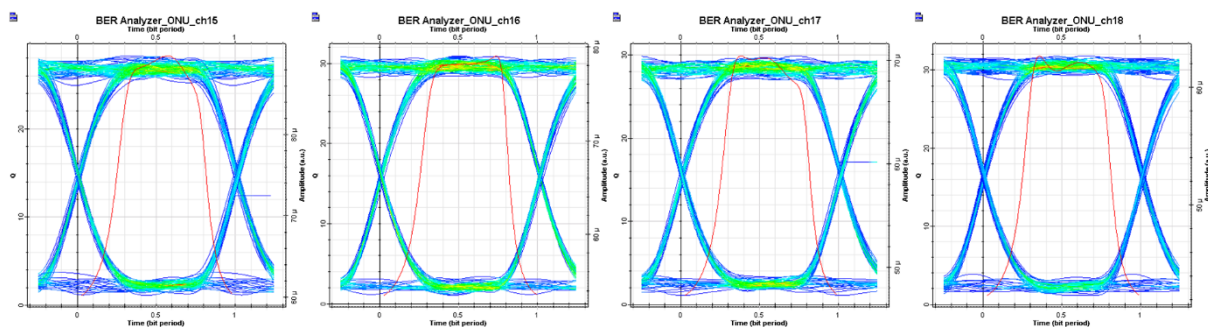
Při nasazení EDFA zesilovače jako booster, tedy na začátek optické trasy, máme nulovou chybovost a vysoký Q-faktor v sestupném směru. Ve směru vzestupném se nám hodnoty oproti referenčnímu měření také zlepšily, ale zlepšení není tak velké jako v případě předzesilovače. Je to způsobeno menším odstupem signálu od šumu. Zesilovač je z pohledu vzestupného směru použit jako předzesilovač, signál tedy projde celou optickou trasou, kde dochází k útlumu a až na konci je zesílen zesilovačem.



Obrázek 6.37: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



Obrázek 6.38: Diagram oka pro OLT



Obrázek 6.39: Diagram oka pro ONU

6.4.7.2 Délka trasy 75 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 75 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.23 a 1.24.

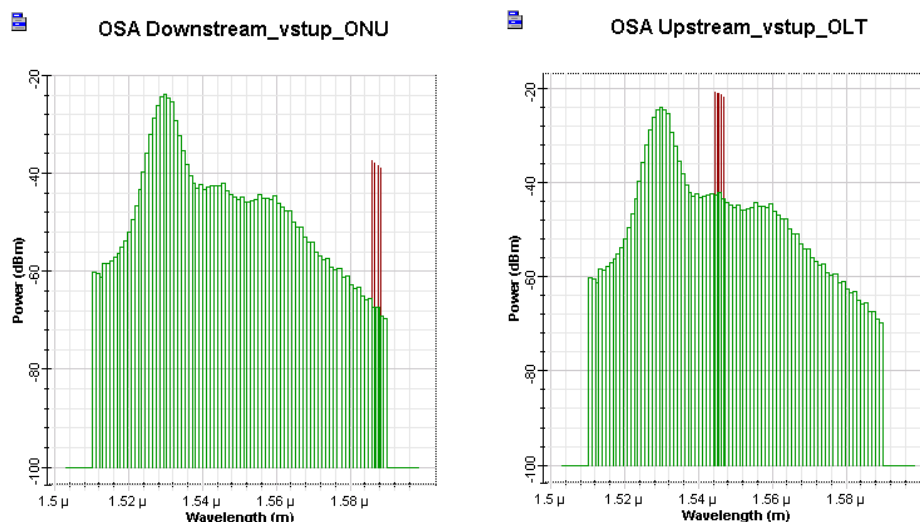
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	2.18821e-088	19.8956	1.4683e-022	9.69847
16. kanál	7.77204e-099	21.0675	1.28647e-018	8.72849
17. kanál	3.04385e-098	21.0032	1.73881e-014	7.57812
18. kanál	4.55697e-113	22.5664	2.80363e-021	9.39597

Tabulka 1.23: Chybovost a Q-faktor

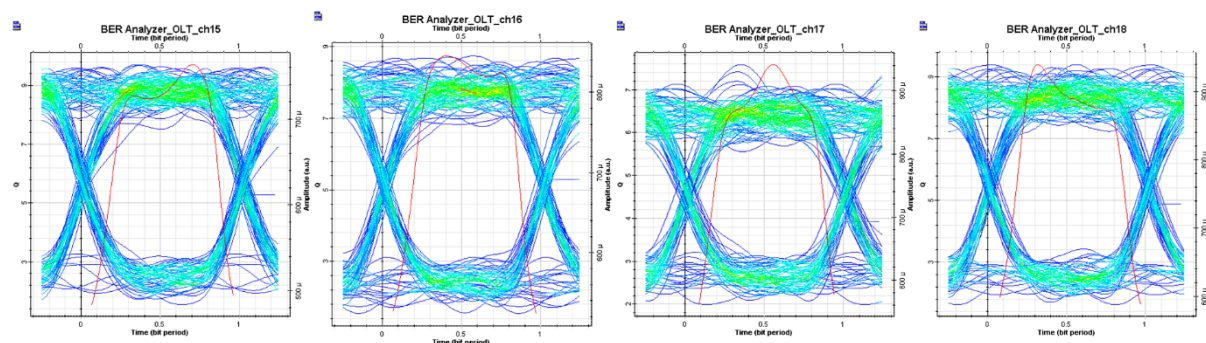
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU (dB)	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT (dB)
15. kanál	-23.596589	-38.912693	23.720134	-25.426206	-21.915032	16.56963
16. kanál	-23.548599	-38.3718	24.453884	-25.442392	-21.915032	16.380332
17. kanál	-23.546886	-37.852161	24.181091	-25.469119	-21.567694	16.117139
18. kanál	-23.547579	-37.327746	24.545398	-25.446787	-21.256379	16.785271

Tabulka 1.24: Výkon signálu a OSNR

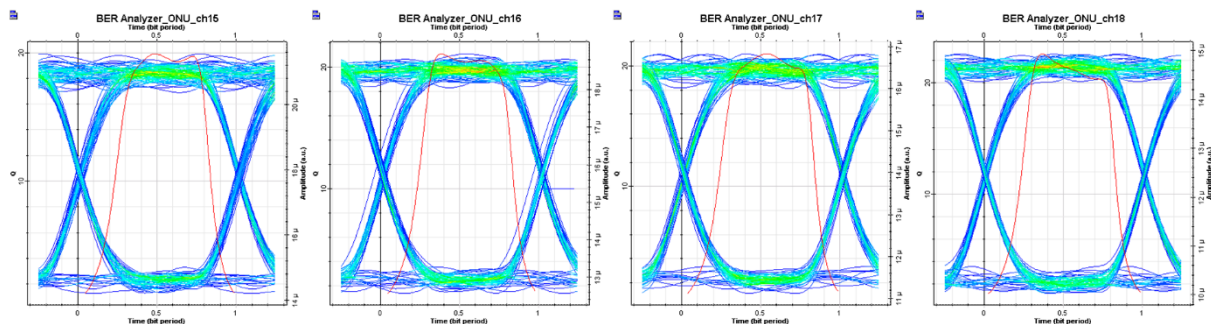
V sestupném směru máme stále dobré výsledky chybovosti, Q-faktoru i odstupu signálu od šumu. Ve směru vzestupném dochází ke zhoršení výsledku z důvodu dalšího snížení OSNR, jak lze vidět na optickém spektru, ale stále nedochází k rozpadu spojení.



Obrázek 6.40: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



Obrázek 6.41: Diagram oka pro OLT



Obrázek 6.42: Diagram oka pro ONU

6.4.7.3 Délka trasy 100 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 100 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.25 a 1.26.

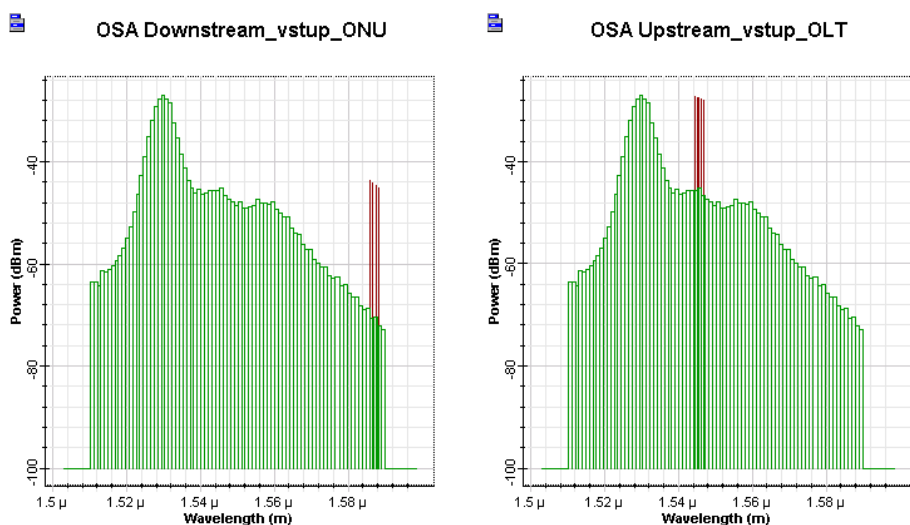
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	6.87019e-033	11,8848	3.66676e-010	6.15573
16. kanál	8.97109e-042	13.4866	1.89972e-010	6.25912
17. kanál	4.43459e-039	13.0238	3.25381e-008	5.39902
18. kanál	5.93563e-052	15.1195	2.44202e-011	6.57318

Tabulka 1.25: Chybovost a Q-faktor

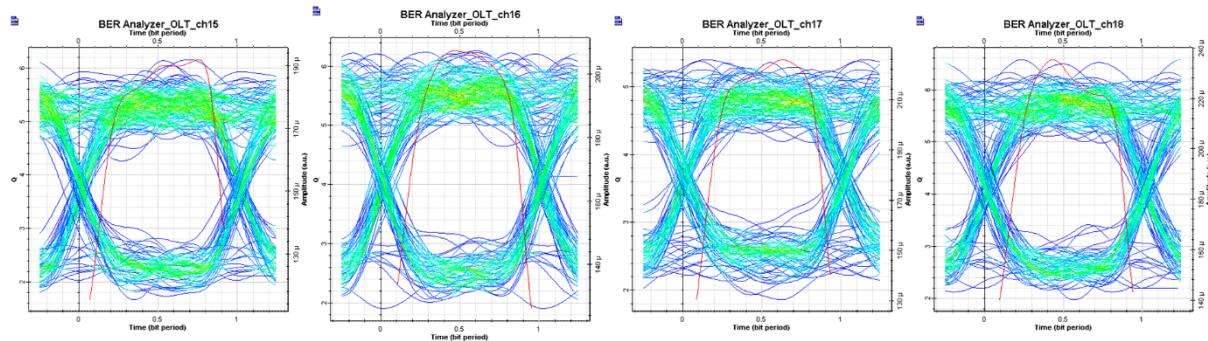
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU (dB)	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT (dB)
15. kanál	-23.560096	-45.124934	20.761036	-25.454324	-28.147469	13.480528
16. kanál	-23.556815	-44.627178	21.438142	-25.415015	-28.147469	13.249149
17. kanál	-23.565729	-44.122894	21.088204	-25.451023	-27.757185	12.914494
18. kanál	-23.556466	-43.584934	21.474968	-25.475297	-27.506057	13.661498

Tabulka 1.26: Výkon signálu a OSNR

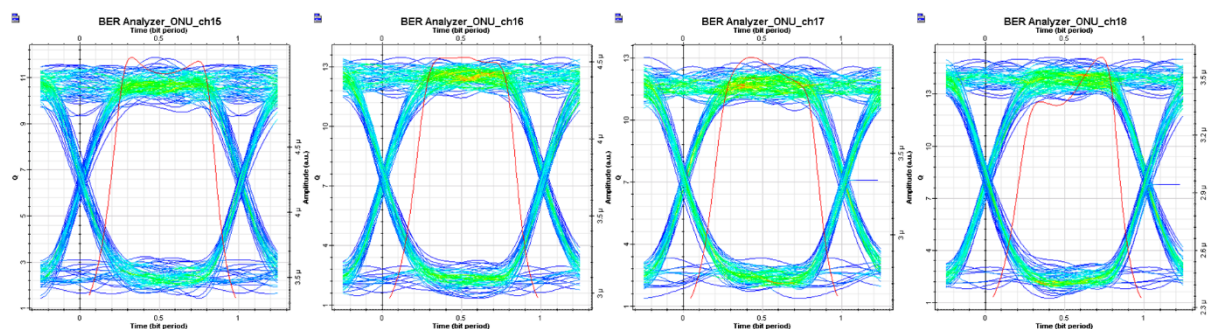
V sestupném směru dochází k velkému navýšení chybovosti a snížení Q-faktoru, i přesto, že hodnota OSNR se pohybuje kolem 33. Dochází k tomu z důvodu malého výkonu signálu. U vzestupného směru se nám dále zhoršuje OSNR, z toho důvodu se navyšuje chybovost, kterou můžeme z naměřených hodnot brát jako hraniční pro optickou komunikaci.



Obrázek 6.43: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



Obrázek 6.44: Diagram oka pro OLT



Obrázek 6.45: Diagram oka pro ONU

6.4.7.4 Délka trasy 125 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 125 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.27 a 1.28.

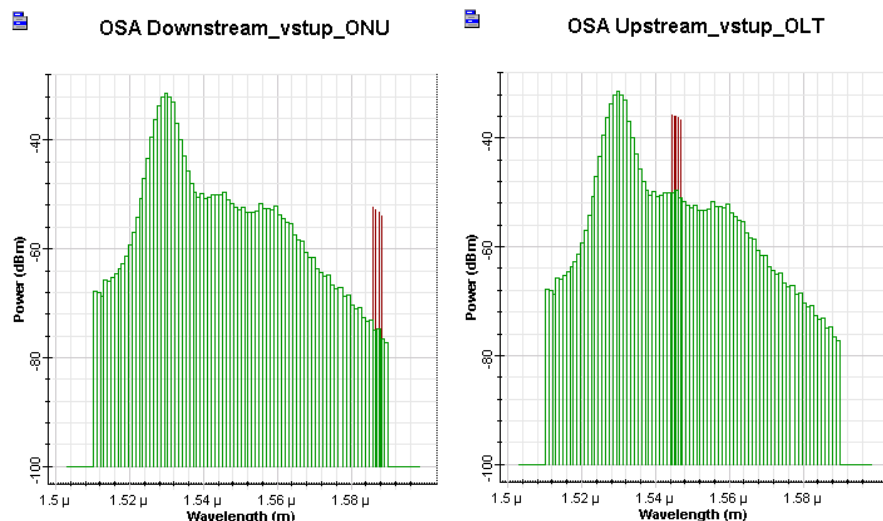
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	2.87229e-008	5.42412	6.45304e-005	3,82
16. kanál	3.44863e-009	5.79265	8.93896e-005	3,74
17. kanál	1.23132e-007	5.15773	0.00112645	3.05465
18. kanál	4.31468e-006	4.44818	0.000191088	3.55063

Tabulka 1.27: Chybovost a Q-faktor

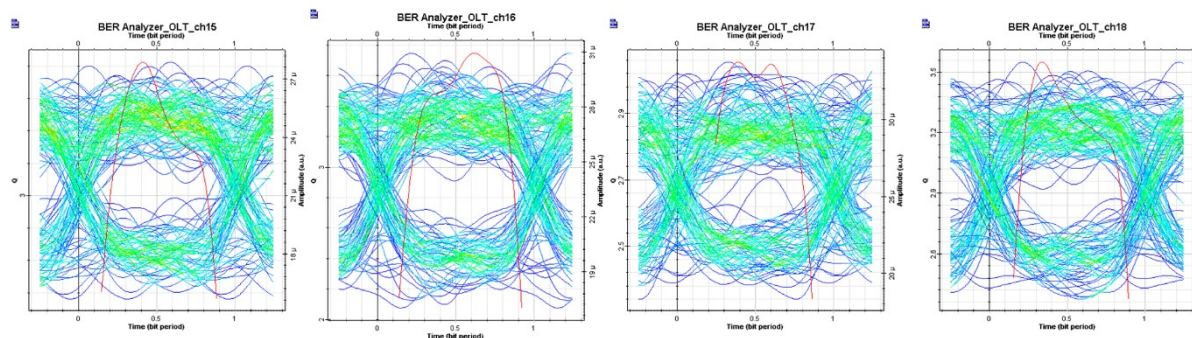
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU (dB)	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT (dB)
15. kanál	-23.605919	-53.92633	16.316665	-25.491563	-36.912639	9.1556148
16. kanál	-23.58575	-53.412981	17.001688	-25.48994	-36.912639	8.9487654
17. kanál	-23.584518	-52.893035	16.683744	-25.414394	-36.516105	8.6346783
18. kanál	-23.612728	-52.387243	17.04714	-25.447365	-36.244329	9.3654104

Tabulka 1.28: Výkon signálu a OSNR

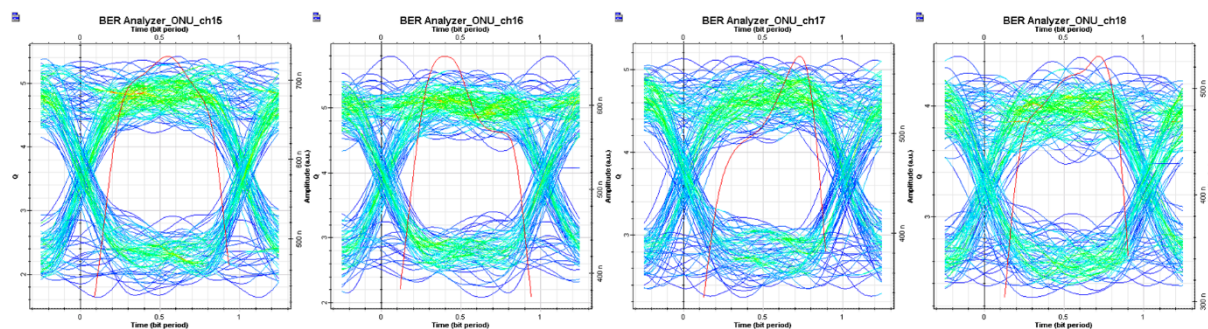
Při 125 km se nám rozpadá spojení v obou směrech. U sestupného směru se nám spojení rozpadá z důvodu slabých výkonů optických kanálů. Ve vzestupném směru máme záporné OSNR, tedy nedokážeme rozlišit šum od optického kanálu, jak lze vidět na obrázku optického spektra pro vzestupný směr. Z diagramu oka lze jasně vidět nerozeznatelnost mezi logickou jedničkou a nulou.



Obrázek 6.46: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



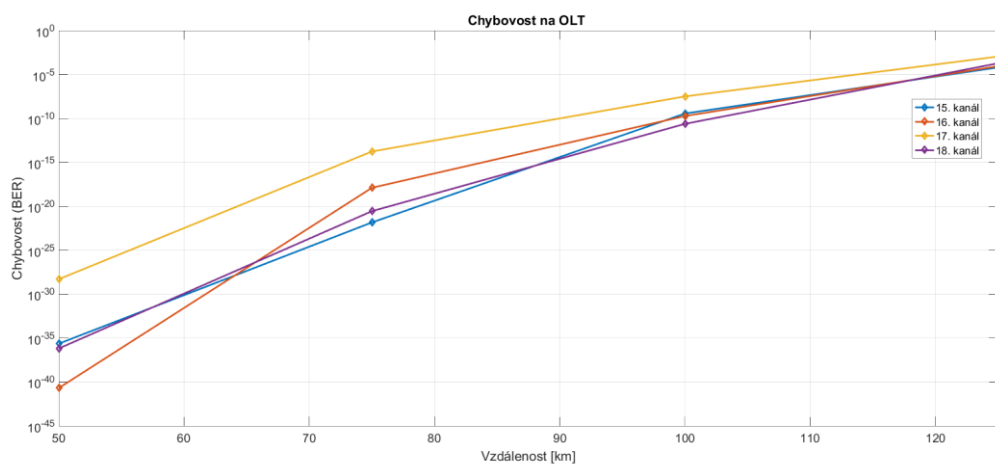
Obrázek 6.47: Diagram oka pro OLT



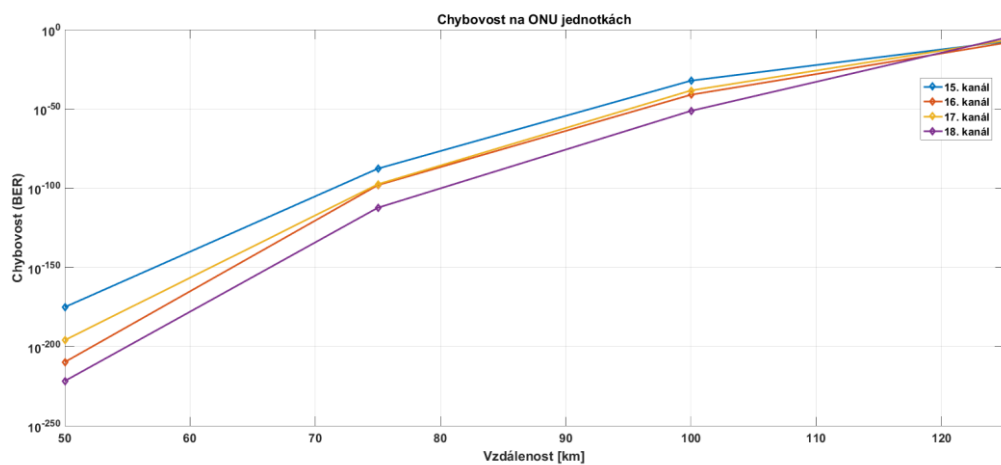
Obrázek 6.48: Diagram oka pro ONU

6.4.7.5 Grafické znázornění

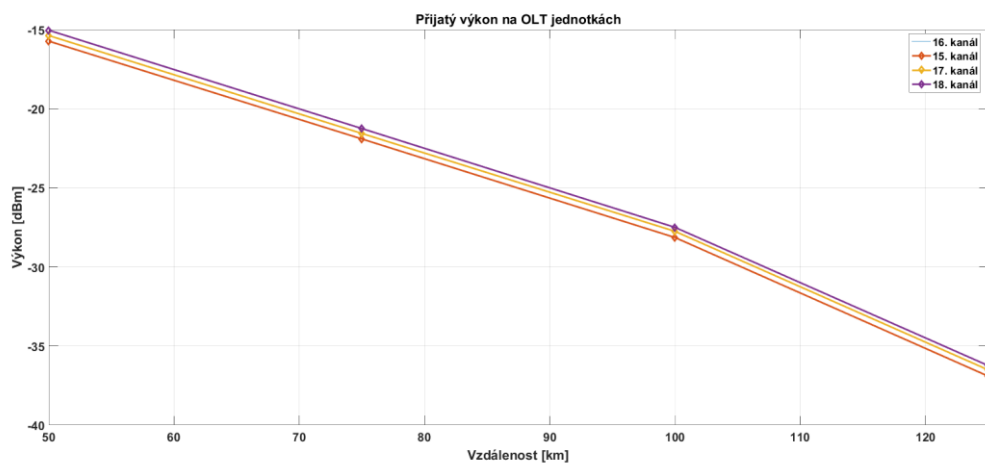
V grafech 6.49 - 6.52 jsou znázorněny chybovosti a výkony signálů všech měřených situací. Při nasazení jako inline zesilovač jsme v jediném případě u této topologie dosáhli stejné překlenuté vzdálenosti jako v případě referenčního měření.



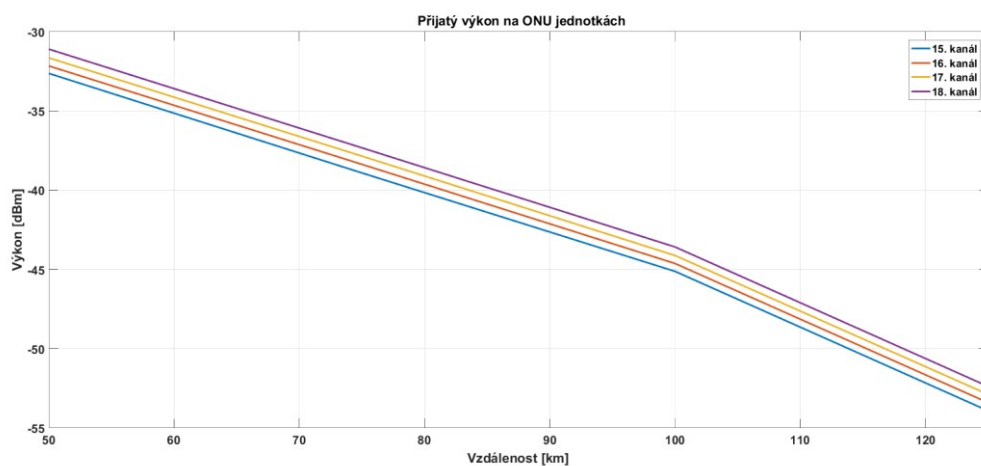
Obrázek 6.49: Chybovost na straně OLT



Obrázek 6.50: Chybovost na straně ONU



Obrázek 6.51: Výkon na straně OLT



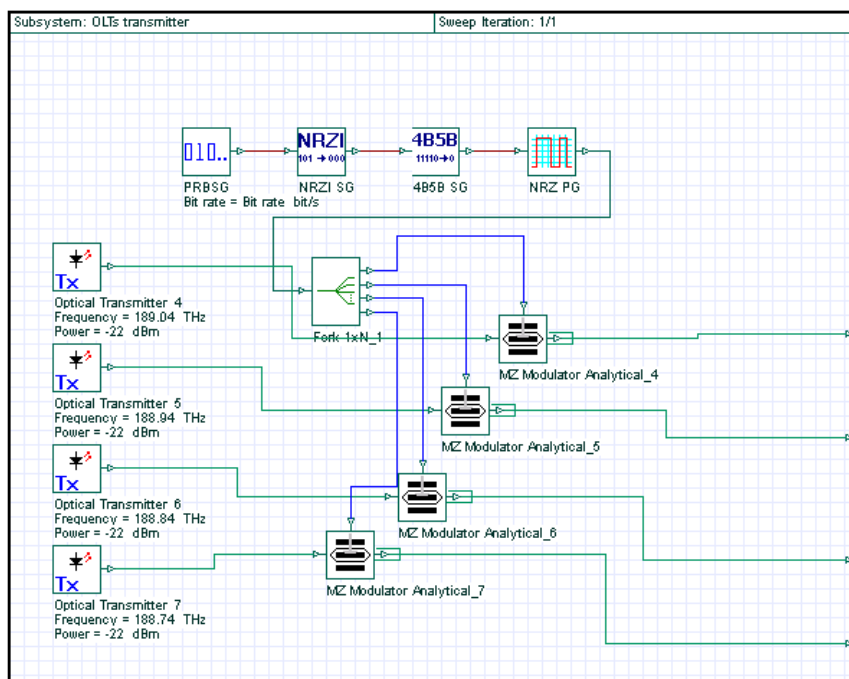
Obrázek 6.52: *Výkon na straně ONU*

6.5 Simulace s použitím komponenty WDM transmitter

6.5.1 OLT

OLT jednotka se skládá ze dvou částí, z přijímací a vysílací.

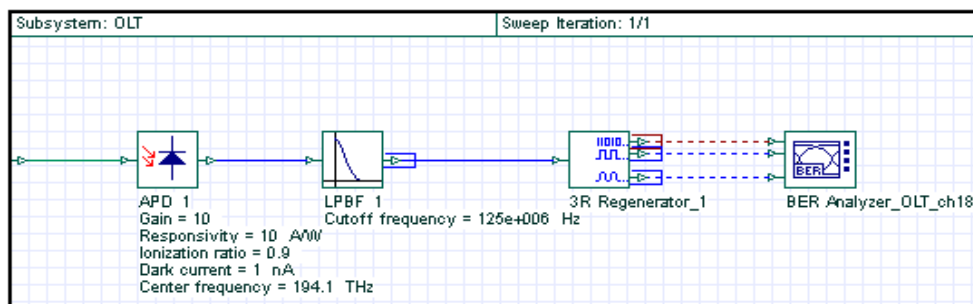
Vysílací část obsahuje 4 Optical Transmittery, každý tento vysílač je nastaven na daný optický kanál. Dále je zde modulační část s generátorem pseudonáhodných čísel. Použitá modulace je NRZI s použitím 4B5B kódu, stejně jako v laboratoři EB316. Tato modulace je na optický kanál namodulována pomocí Mach-Zehnder modulátoru. Nakonec jsou všechny kanály pomocí AWG splittru v režimu MUX přivedeny do společného optického vlákna. Centrální frekvence je nastavena na 189.04 THz s odstupem -100 GHz a na nepoužité vstupy jsou přivedeny optické nuly. Hodnoty útlumu na veškerých komponentech jsou nastaveny tak, aby byl výkon signálu při průchodu AWG na hodnotě -24 dBm.



Obrázek 6.53: OLT vysílací část

Přijímací část OLT jednotky je stejná jako u předchozí topologie. Skládá se z fotodiody nastavené na daný optický kanál, dolní propusti, 3R regenerátoru pro obnovení tvaru signálu a jeho časovou základnu a BER analyzátoru, který dokáže vypočítat chybovost, Q-faktor a vykreslit diagram oka.

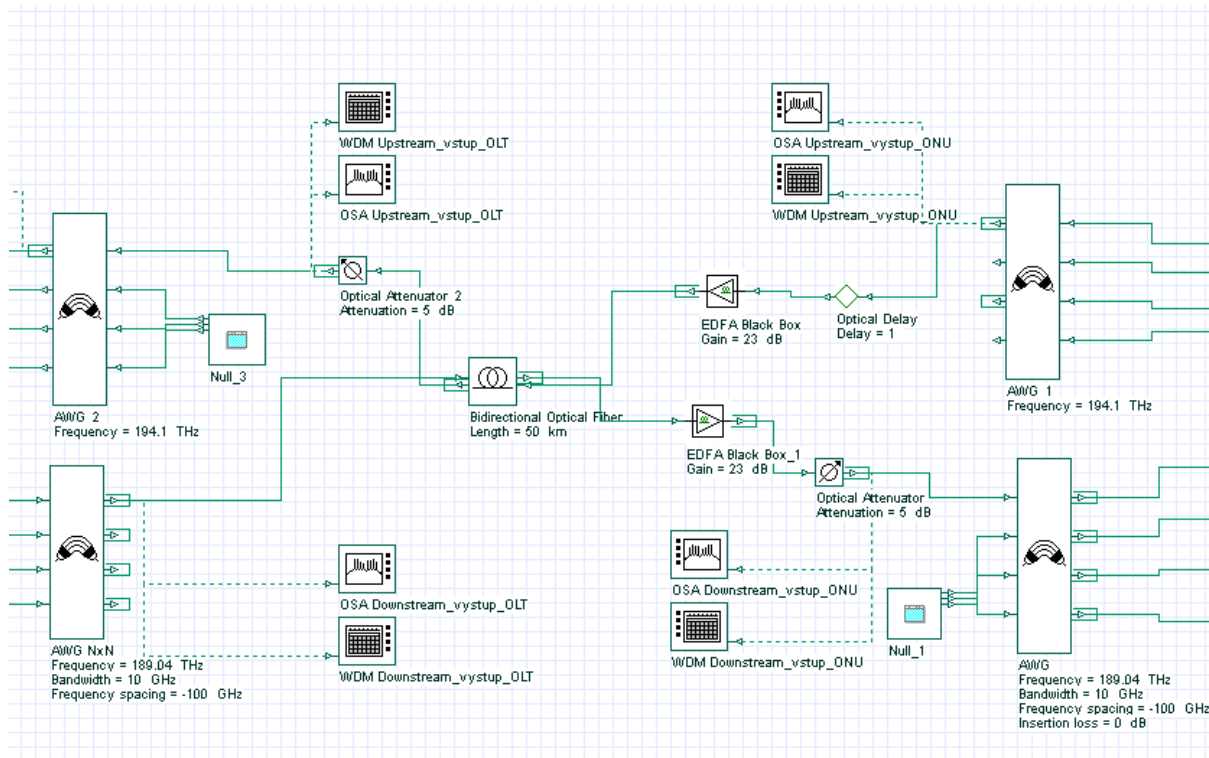
Před přijímací částí OLT jednotky se nachází AWG splitter v režimu DEMUX, který má za úkol demultiplexovat optické kanály. Centrální frekvence je nastavena na 194.1 THz s odstupem -100 GHz podle specifikace pro DWDM systémy. Na nepoužité vstupy jsou přivedeny optické nuly.



Obrázek 6.54: OLT přijímací část

6.5.2 ODN

Distribuční část je stejná jako u topologie s využitím Fabry-Perotových laserů. Skládá se tedy z optického vlákna specifikace G.652.C/D s nastaveným vložným útlumem 25 dB/km, komponenty *optical dealy* nutné pro obousměrnou simulaci, EDFA zesilovače v daném režimu a součástky *optical attenuator* simulující útlum na *AWG splittrech* před OLT a ONU jednotkami.

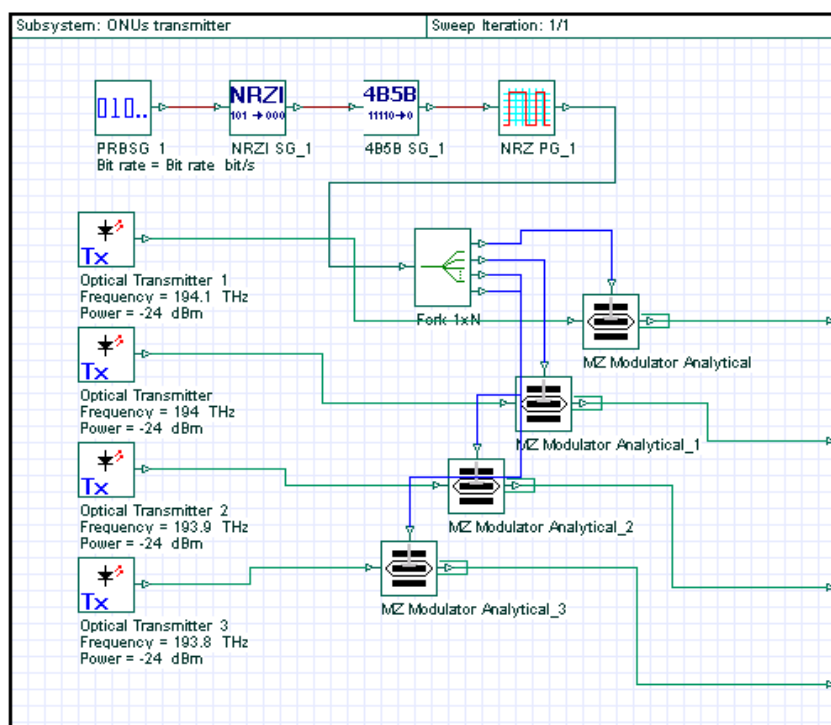


Obrázek 6.55: ODN s EDFA zesilovačem jako předzesilovač

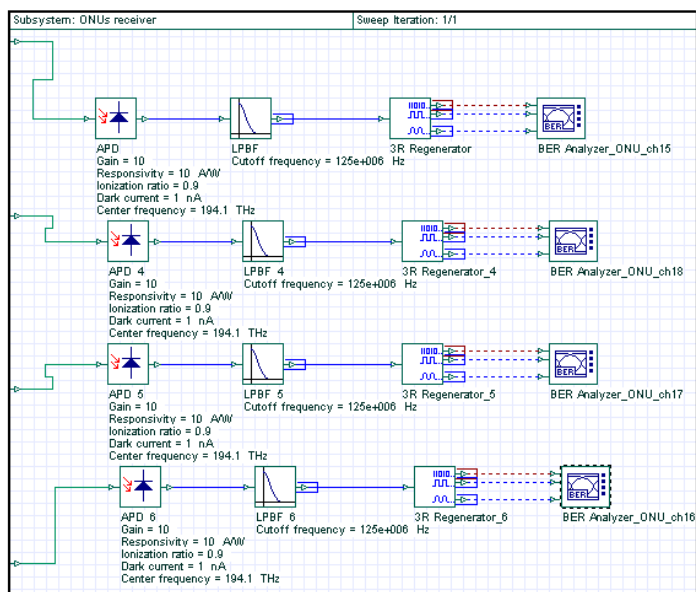
6.5.3 ONU

Stejně jako OLT jednotka se i ONU skládá ze dvou částí, z přijímací a vysílací části.

Vysílací část je podobná jako u OLT, jediný rozdíl je v nastavených frekvencích, kde využíváme optických kanálů z C pásma. ONU vysílací část se tedy skládá z optického vysílače, generátoru pseudonáhodných čísel, modulace NRZI s 4B5B kódováním, a Mach-Zehnder modulátoru. Za vysílači se nachází *AWG splitter* s nastavenou centrální vlnovou délkou 194,1 THz a odstupem - 100 GHz. Útlumy jsou nastaveny tak, aby po průchodu AWG splitterem byl výkon signálu -26 dBm.



Obrázek 6.56: Vysílací část ONU



Obrázek 6.57: Příjímací část ONU

Příjímací část je stejná jako u OLT jednotky - PIN fotodioda, dolní propust, 3R regenerátor a *BER analyzer*. Před ONU jednotkou se nachází *AWG splitter* v režimu DEMUX, na volné vstupy jsou přivedeny optické nuly.

6.6 Výsledky

První měření jsme udělali jako referenční, délka optického vlákna byla nastavena na 50 km a v topologii nefiguroval žádný zesilovač. Jak již bylo zmíněno dříve, OLT jednotky mají vysílací výkon přibližně -26 dBm a ONU jednotky vysílají s výkonem -26 dBm. Tyto hodnoty se promítají zejména při měření bez zesilovače. Naměřené hodnoty shrneme v tabulkách 1.29 a 1.30.

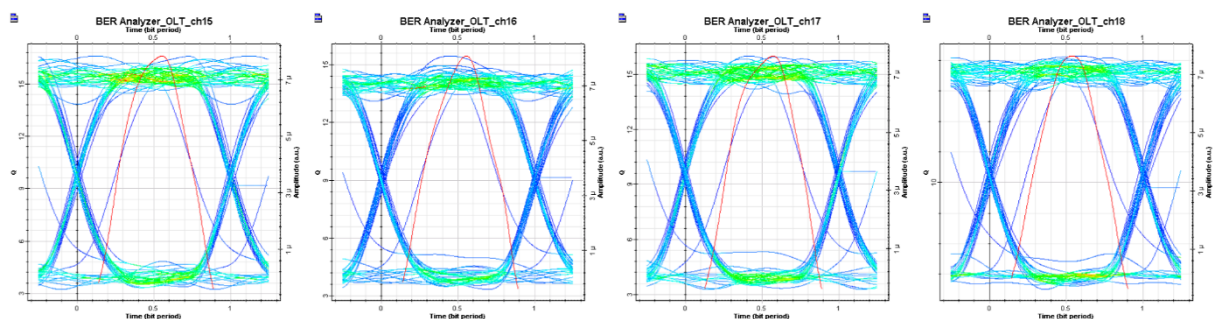
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	1.11523e-115	22.8292	3.48891e-062	16.5992
16. kanál	6.00149e-131	24.3169	4.28497e-054	15.4407
17. kanál	4.22758e-131	24.3338	6.03591e-058	16.0026
18. kanál	1.13333e-132	24.4819	4.91975e-075	18.2905

Tabulka 1.29: Chybovost a *Q*-faktor

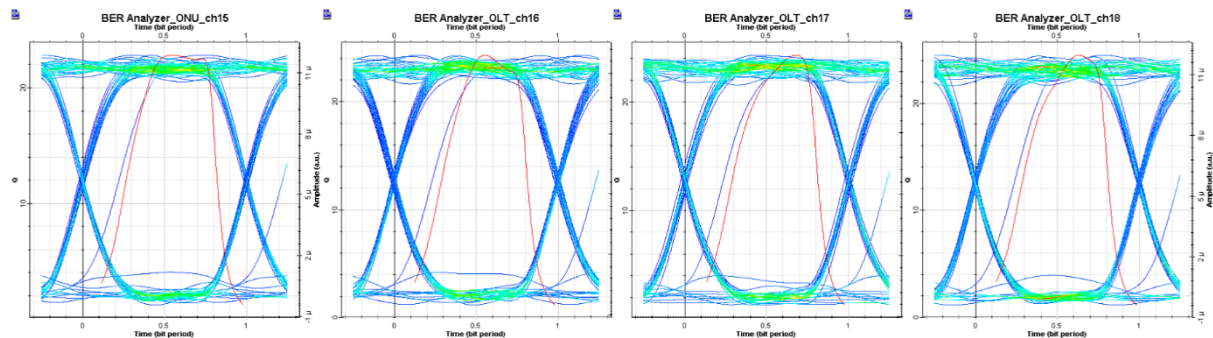
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.014195	-36.756209	63.243791	-26.191561	-43.678669	56.321331
16. kanál	-24.013975	-36.756546	63.243454	-26.191907	-43.678964	56.321036
17. kanál	-24.014522	-36.756677	63.243323	-26.191916	-43.678741	56.321259
18. kanál	-24.014738	-36.756466	63.243534	-26.191991	-43.678897	56.321103

Tabulka 1.30: Výkon kanálů a OSNR

V tabulkách vidíme, že v trase dochází k chybovosti v obou směrech, je to způsobeno relativně nízkým výkonem vysílačů, kde dále dochází k útlumu na trase způsobené vláknem a poté *AWG splittrem*. Ve vzestupném směru je rozdíl znatelnější a to kvůli nižším výkonům vysílací části ONU. Odstup signálu od šumu je v tomto případě vysoký. Na obrázcích 6.58 a 6.59 vidíme diagramy oka pro OLT jednotky a ONU jednotky.



Obrázek 6.58: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.59: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.1 Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako předzesilovače

6.6.1.1 Délka trasy 50 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotě 50 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.31 a 1.32.

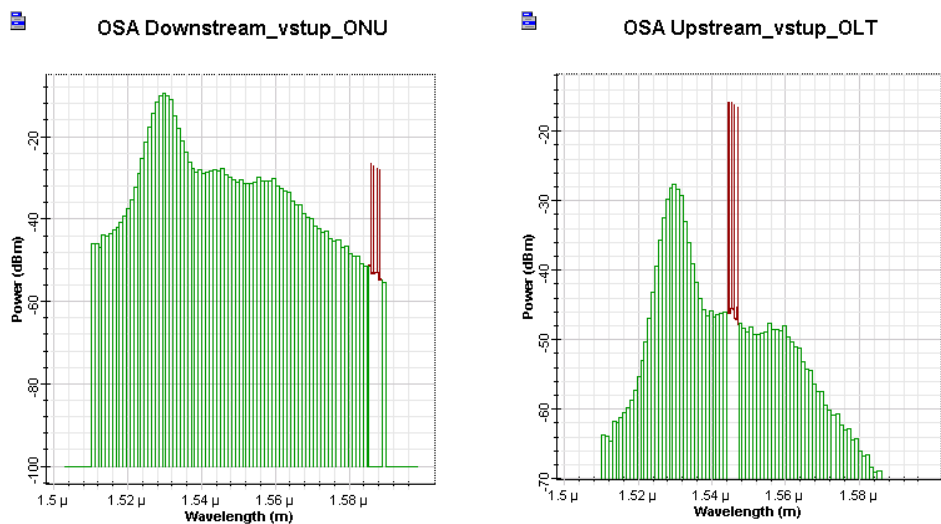
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	5.98413e-293	36.5608	0	46.7348
16. kanál	4.18711e-312	37.7467	0	47.7045
17. kanál	2.32743e-279	35.6953	0	47.7156
18. kanál	0	41.9708	0	46.7506

Tabulka 1.31: *Chybovost a Q-faktor*

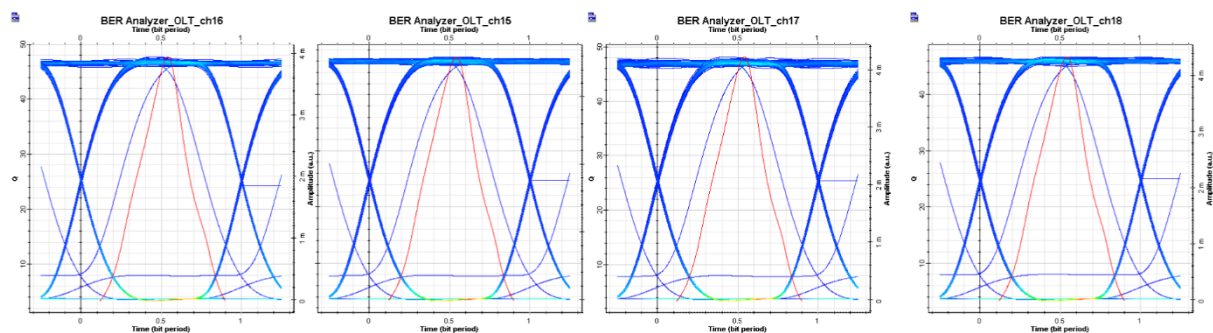
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.095368	-28.164621	21.682554	-26.095487	-16.688431	25.569056
16. kanál	-24.095567	-27.676352	20.460943	-26.09542	-16.302493	25.067025
17. kanál	-24.095526	-27.161709	21.107859	-26.095445	-16.008909	24.658341
18. kanál	-24.095462	-26.63768	20.650059	-26.095332	-15.854725	25.372315

Tabulka 1.32: *Výkon signálu a OSNR*

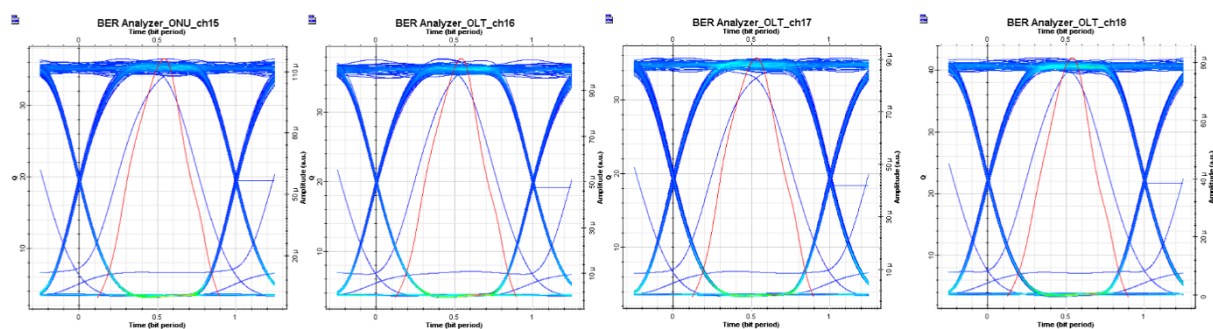
Při vložení EDFA zesilovače do trasy lze vidět jasný pokles chybovosti, která je v případě vzestupného směru nulová, v případě sestupného směru téměř nulová. U vzestupného směru lze také pozorovat velký nárůst výkonu signálu a to na hodnotu větší než výkon samotného vysílače. Oproti topologii bez zesilovače lze jasně vidět i snížení odstupu signálu od šumu. Samotný zesilovač vnáší ASE šum do optické trasy. Tento šum můžeme pozorovat na optickém spektru jako zelenou barvu.



Obrázek 6.60: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



Obrázek 6.61: Diagram oka pro OLT



Obrázek 6.62: Diagram oka pro ONU

6.6.1.2 Délka trasy 75 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 75 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.33 a 1.34.

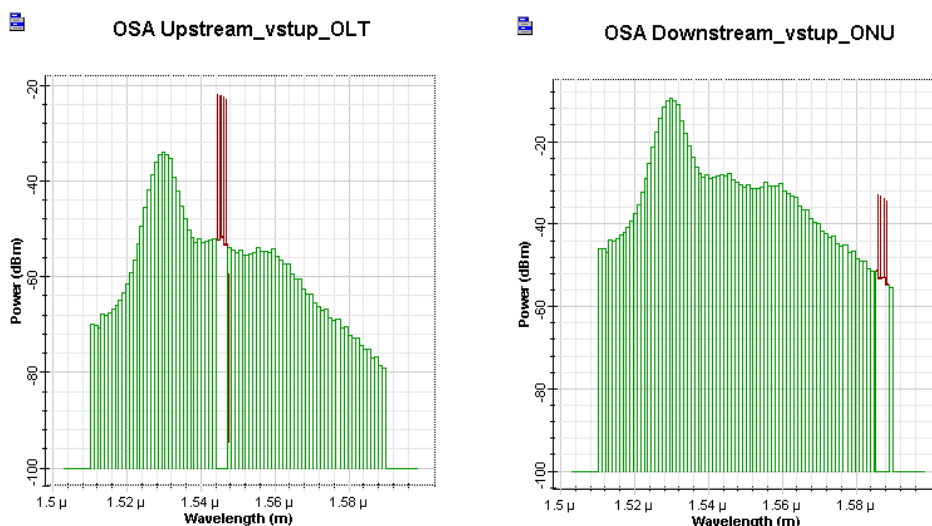
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	1.27615e-145	25.6695	0	41.6468
16. kanál	2.67797e-167	27.5427	0	42.3459
17. kanál	4.56471e-135	24.7064	0	39.9584
18. kanál	4.01939e-147	25.8037	0	44.5959

Tabulka 1.33: Chybovost a Q-faktor

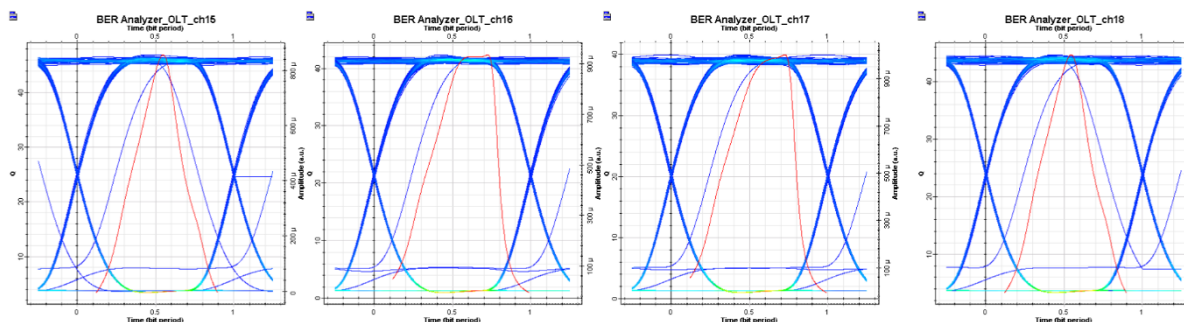
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.140585	-34.374092	15.55658	-26.111979	-22.901115	25.613533
16. kanál	-24.140451	-33.868567	14.280952	-26.11179	-22.522961	25.11893
17. kanál	-24.14043	-33.351806	14.933563	-26.112011	-22.223808	24.695587
18. kanál	-24.140519	-32.821303	14.459435	-26.111831	-22.069623	25.473418

Tabulka 1.34: Výkon signálu a OSNR

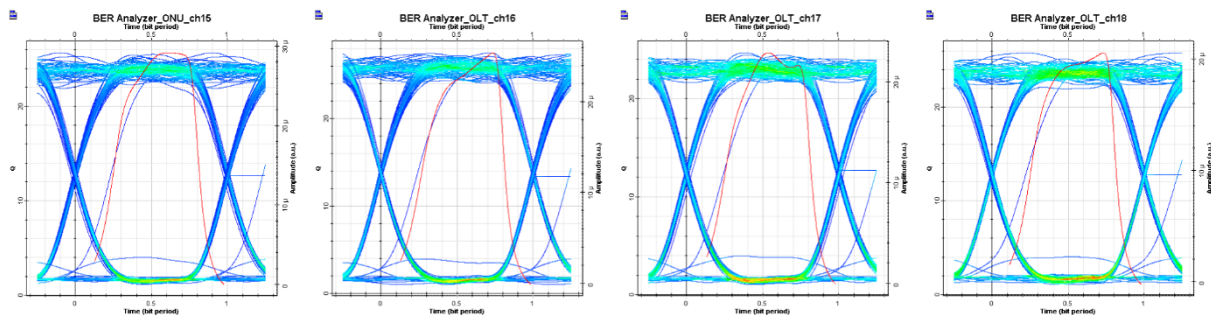
Při dalším navyšování délky vlákna se nám logicky snižují sledované parametry a to především v sestupném směru. Je to dáno EDFA zesilovačem, který je určen především pro C pásmo, tedy v našem případě pro vzestupný směr. Tento jev se bude projevovat s přibývajícím délkou optické trasy stále víc.



Obrázek 6.63: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



Obrázek 6.64: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.65: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.1.3 Délka trasy 100 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 100 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.35 a 1.36.

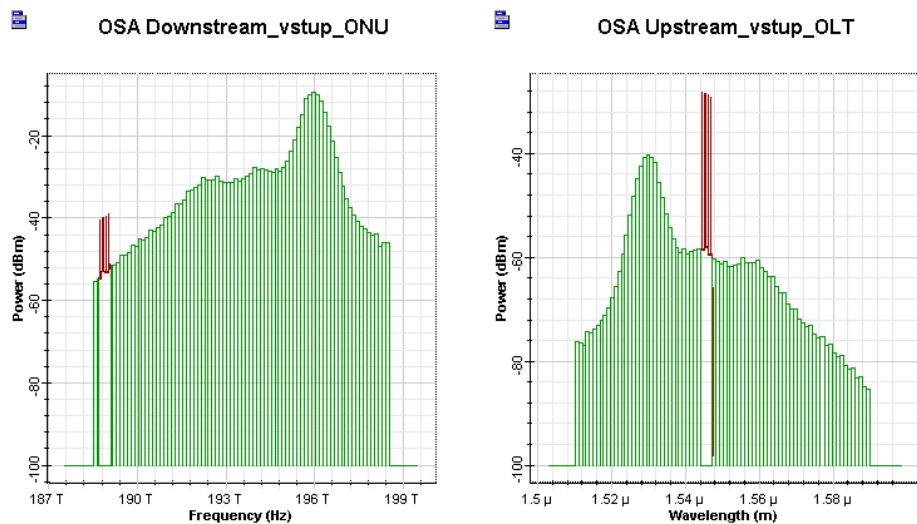
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	1.34108e-028	11.0318	0	40.049
16. kanál	6.69692e-031	11.27080	0	40.8575
17. kanál	5.31521e-023	9.80548	4.69363e-313	37.8012
18. kanál	1.25874e-022	9.71836	0	40.1519

Tabulka 1.35: Chybovost a Q-faktor

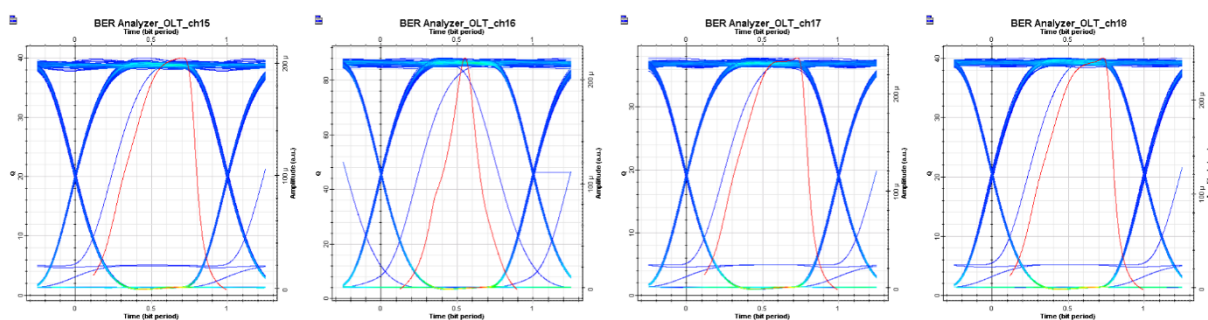
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.372546	-40.646376	9.2543657	-26.106333	-29.145545	25.596018
16. kanál	-24.372588	-40.170463	7.965019	-26.105986	-28.762145	25.129814
17. kanál	-24.372512	-39.64302	8.6088245	-26.106303	-28.470633	24.619719
18. kanál	-24.372275	-39.061249	8.2283028	-26.105998	-28.312482	25.424377

Tabulka 1.36: Výkon signálu a OSNR

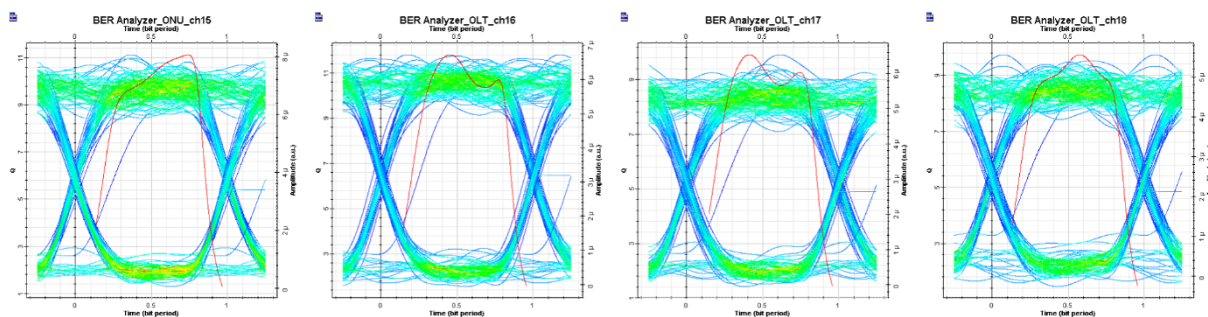
Při 100 km optické trasy dochází v sestupném směru k poměrně vysoké chybovosti, stále je ale možné tento systém na tuto vzdálenost provozovat. Chybovost a nízký Q-faktor jsou způsobeny malým odstupem signálu od šumu, ten můžeme pozorovat i při pohledu na optické spektrum na konci sestupného směru. Ve vzestupném směru máme stále chybovost téměř nulovou. Když porovnáme diagramy oka pro ONU a OLT jednotky, spatříme velké rozdíly, kdy pro OLT jednotky mají diagramy oka ideální tvar, zatímco pro ONU jednotky jsou již hůře rozpoznatelné.



Obrázek 6.65: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



Obrázek 6.66: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.67: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.1.4 Délka trasy 125 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 125 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.37 a 1.38.

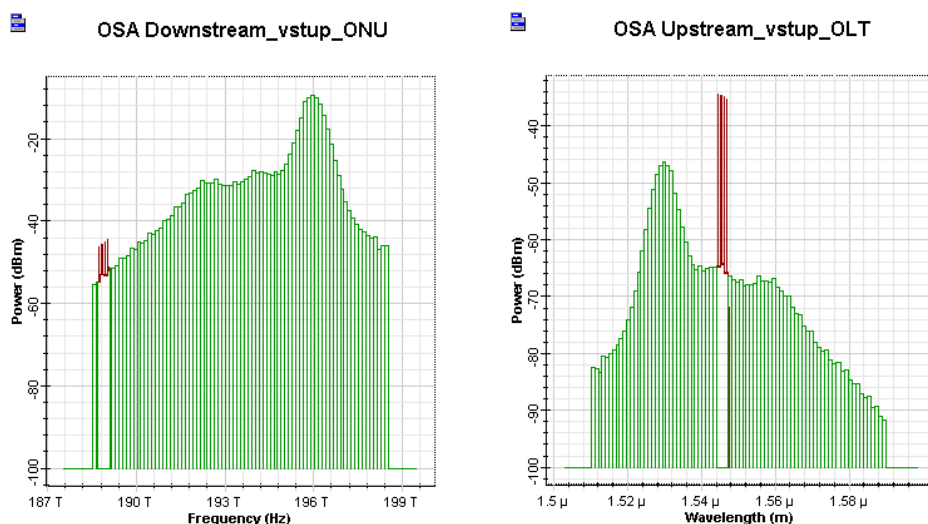
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	0.00013569	3.64112	2.61061e-287	36.2018
16. kanál	0.000262128	2.09957	1.32468e-272	35.2534
17. kanál	0.000660473	3.21053	7.00412e-267	34.8786
18. kanál	0.00242425	2.81685	2.17261e-306	37.3939

Tabulka 1.37: Chybovost a Q-faktor

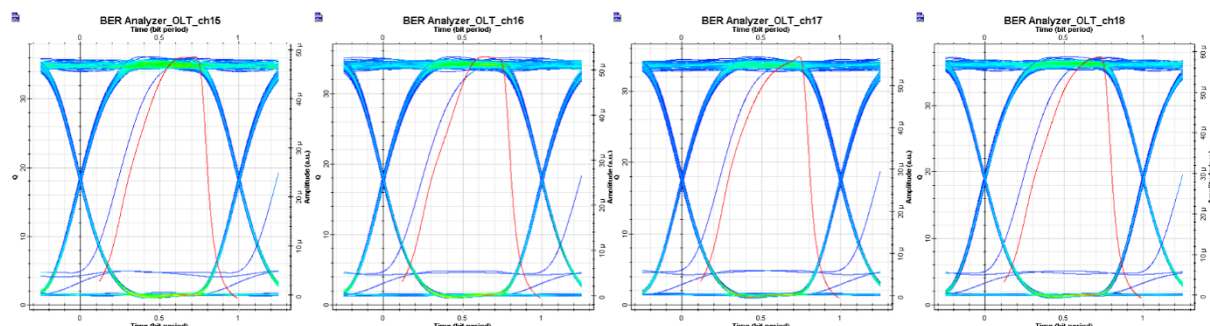
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.234158	-47.168031	2.7088352	-26.23433	-35.353618	25.598841
16. kanál	-24.234089	-46.678716	1.4505385	-26.234188	-34.969234	25.154098
17. kanál	-24.234281	-46.157645	2.1496019	-26.234146	-34.675405	24.717869
18. kanál	-24.234132	-45.482645	1.749859	-26.234328	-34.524556	25.471672

Tabulka 1.38: Výkon signálu a OSNR

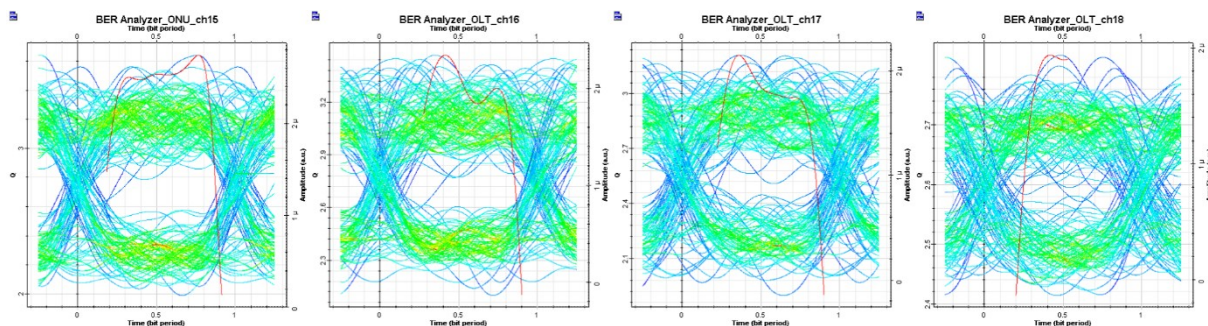
Při této délce vlákna dochází k rozpadu spojení. Je to způsobeno vysokou chybovostí v sestupném směru. Ta je zapříčiněna nízkým odstupem signálu od šumu. Z diagramu oka již nejde korektně rozeznat logickou 1 a 0. Ve vzestupném směru jsou stále výborné hodnoty všech důležitých parametrů, proto lze předpokládat, že v tomto směru bychom byli schopni překlenout delší vzdálenosti.



Obrázek 6.68: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný směr (vlevo) a vzestupný směr (vpravo)



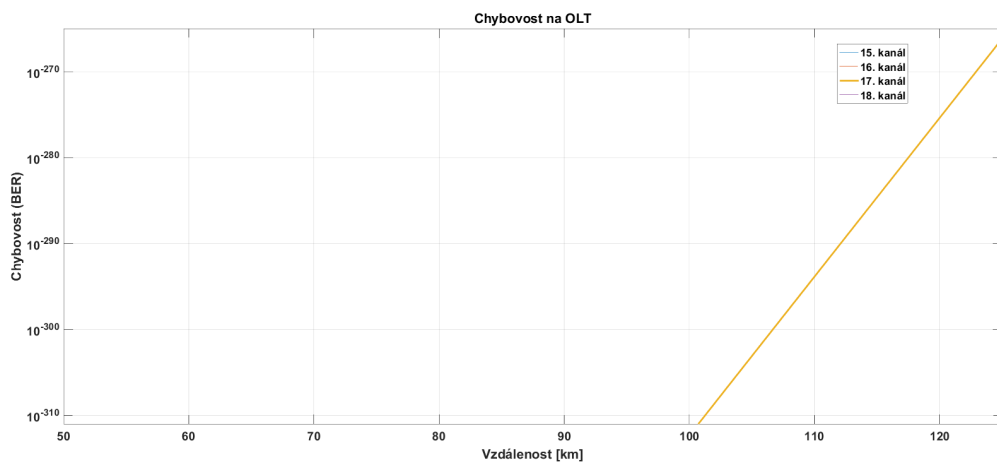
Obrázek 6.69: Diagram oka pro OLT jednotky



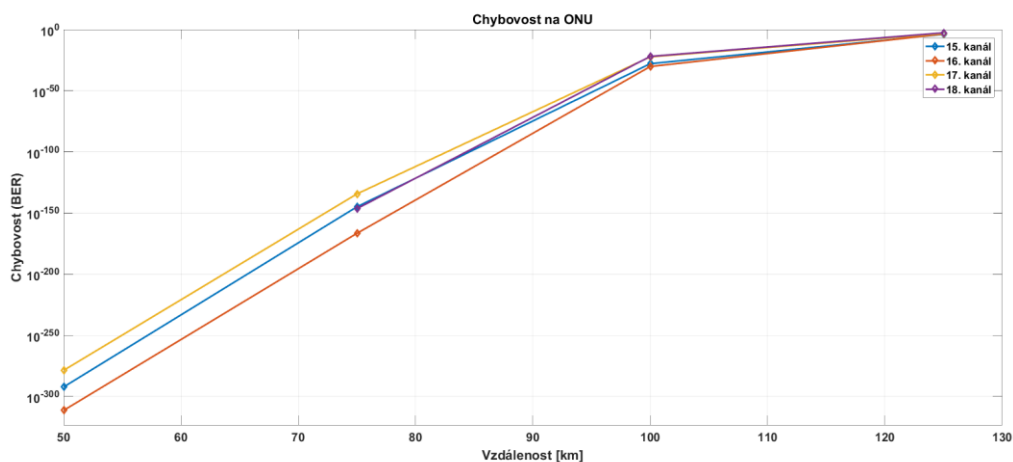
Obrázek 6.70: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.1.5 Grafické znázornění

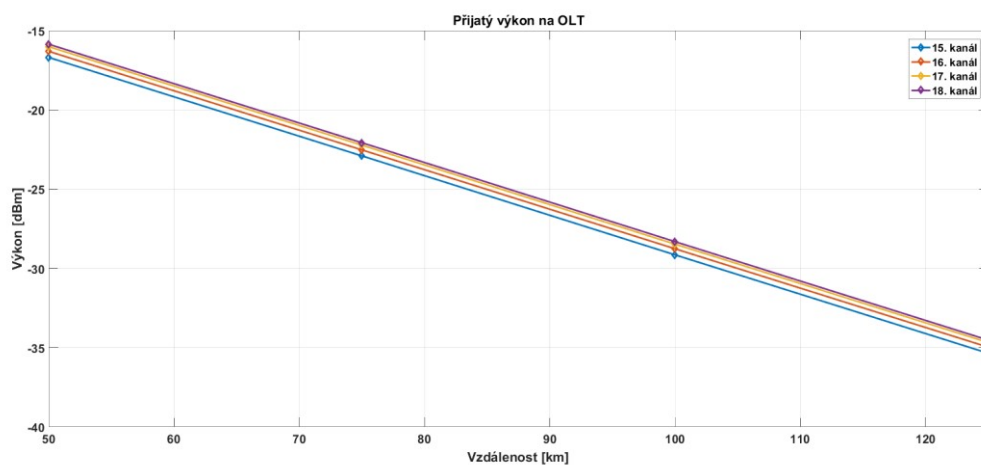
V grafech na obrázcích 6.71 - 6.74 jsou znázorněny chybovosti a výkony signálů všech měřených situací. Oproti referenčnímu měření jsme překlenuli až 100 km vzdálenost, zesilovač je určen především pro C pásmo, ve kterém bychom podle výsledku dosáhli delších vzdáleností, avšak v L pásmu je již velice degradován výkon signálu a s ním spojené OSNR, kvůli kterému dochází k obrovské chybovosti a následnému rozpadu spojení.



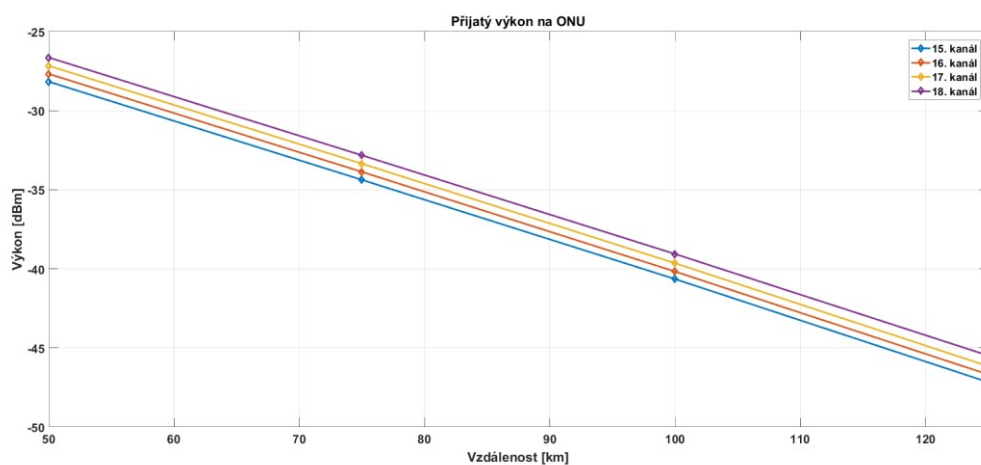
Obrázek 6.71: Chybovost na OLT jednotkách



Obrázek 6.72: Chybovost na ONU jednotkách



Obrázek 6.73: výkon na OLT jednotkách



Obrázek 6.74: Výkon na ONU jednotkách

6.6.2 Trasa s nasazením EDFA zesilovače s režimu booster

6.6.2.1 Délka trasy 50 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 50 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.39 a 1.40.

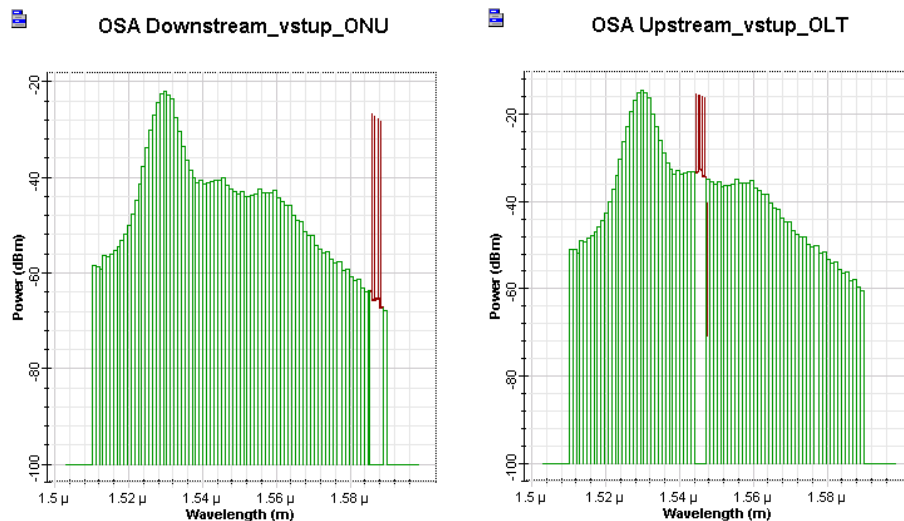
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	0	46.9019	1.02211e-172	27.9917
16. kanál	0	46.7685	3.08063e-133	24.5355
17. kanál	0	49.9573	3.93818e-106	21.8491
18. kanál	0	45.7193	3.20945e-122	23.4807

Tabulka 1.39: Chybovost a Q-faktor

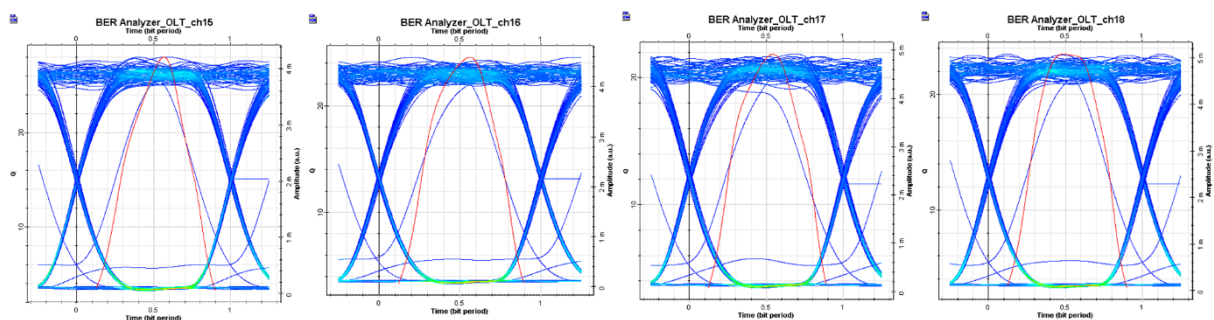
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.095368	-28.169713	34.23278	-26.095487	-16.282241	13.116823
16. kanál	-24.095567	-27.675038	32.979896	-26.09542	-15.900101	12.628023
17. kanál	-24.095526	-27.16178	33.595481	-26.095445	-15.585161	12.235893
18. kanál	-24.095462	-26.640031	33.177587	-26.095332	-15.417857	12.99598

Tabulka 1.40: Výkon signálu a OSNR

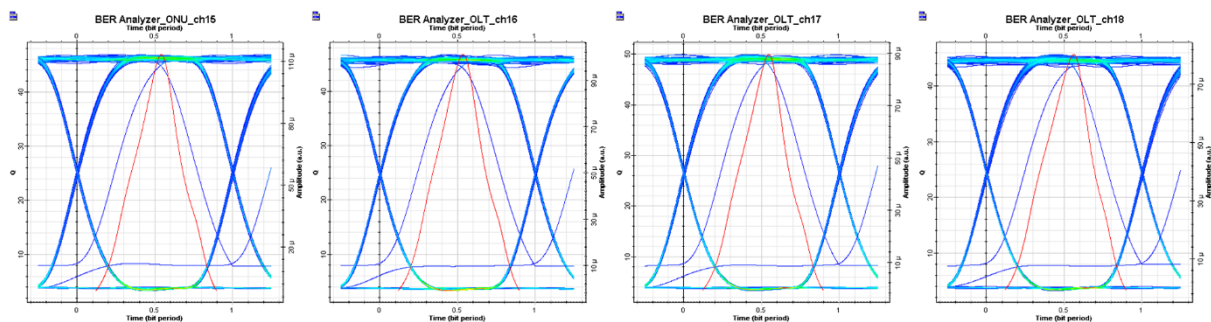
Při nasazení EDFA zesilovače jako booster, tedy na začátek optické trasy, máme nulovou chybovost a vysoký Q-faktor v sestupném směru. Ve směru vzestupném se hodnoty oproti referenčnímu měření také zlepšily, ale zlepšení není tak velké jako v nasazení předzesilovače. Je to způsobeno menším odstupem signálu od šumu. Zesilovač je z pohledu vzestupného směru použit jako předzesilovač, tedy signál projde celou optickou trasou, kde dochází k útlumu a až na konci je zesílen zesilovačem.



Obrázek 6.75: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



Obrázek 6.76: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.77: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.2.2 Délka trasy 75 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 75 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.41 a 1.42.

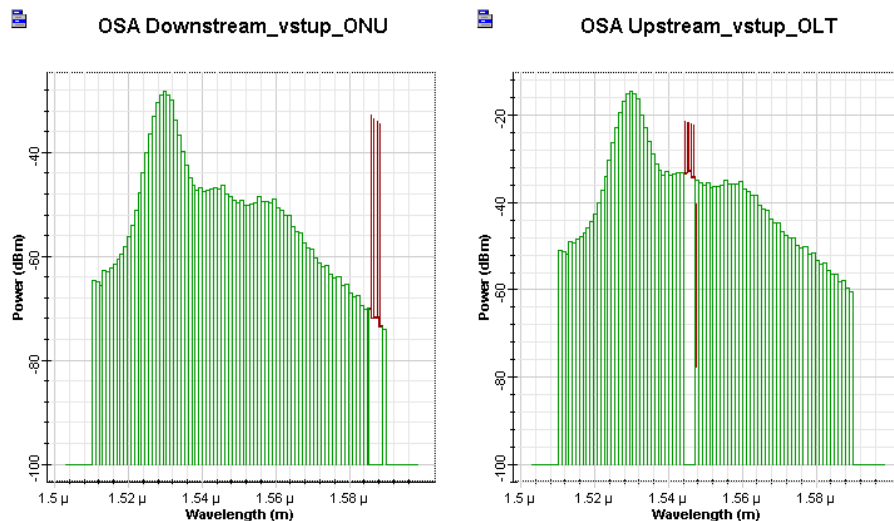
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	0,00	39.7033	2.23299e-054	15.4821
16. kanál	3.56718e-256	34.1669	3.5552e-059	16.1774
17. kanál	5.73111e-250	33.7475	1.09758e-046	14.296
18. kanál	9.674e-254	34.0041	3.81893e-058	16.0292

Tabulka 1.41: Chybovost a Q-faktor

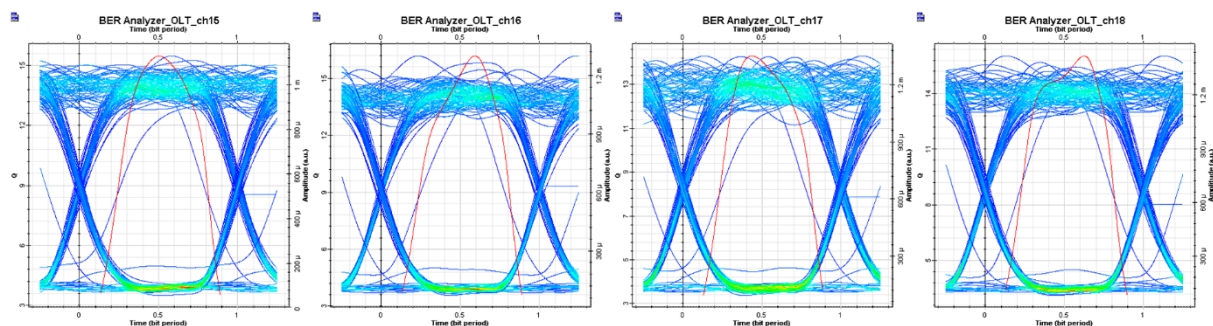
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.141917	-34.453409	34.227635	-26.200169	-22.647185	6.6838265
16. kanál	-24.142014	-33.962003	32.913654	-26.200377	-22.260857	6.3135907
17. kanál	-24.142096	-33.448236	33.609611	-26.200212	-21.932236	5.886343
18. kanál	-24.142114	-32.924066	33.082391	-26.200405	-21.772093	6.6069376

Tabulka 1.42: Výkon signálu a OSNR

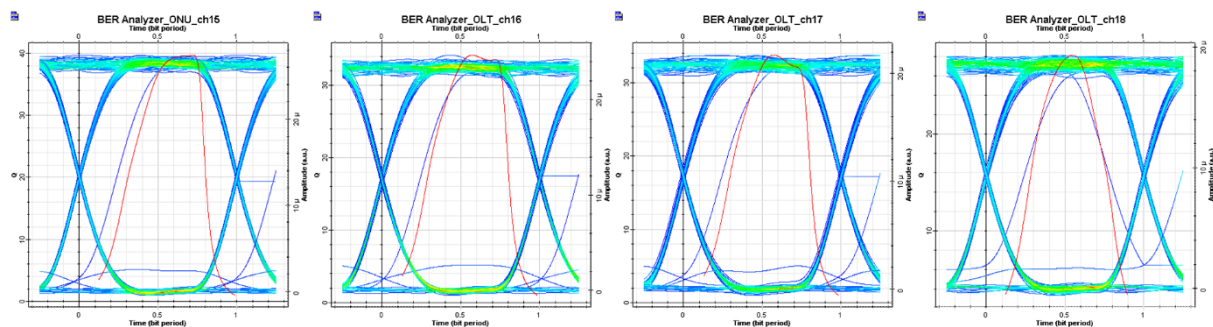
V sestupném směru máme stále dobré výsledky chybovosti, Q-faktoru i odstupu signálu od šumu. Ve směru vzestupném dochází ke zhoršení výsledku z důvodu dalšího snížení OSNR, jak lze vidět na optickém spektru, ale stále nedochází k rozpadu spojení.



Obrázek 6.78: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



Obrázek 6.79: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.80: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.2.3 Délka trasy 100 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 100 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.43 a 1.44.

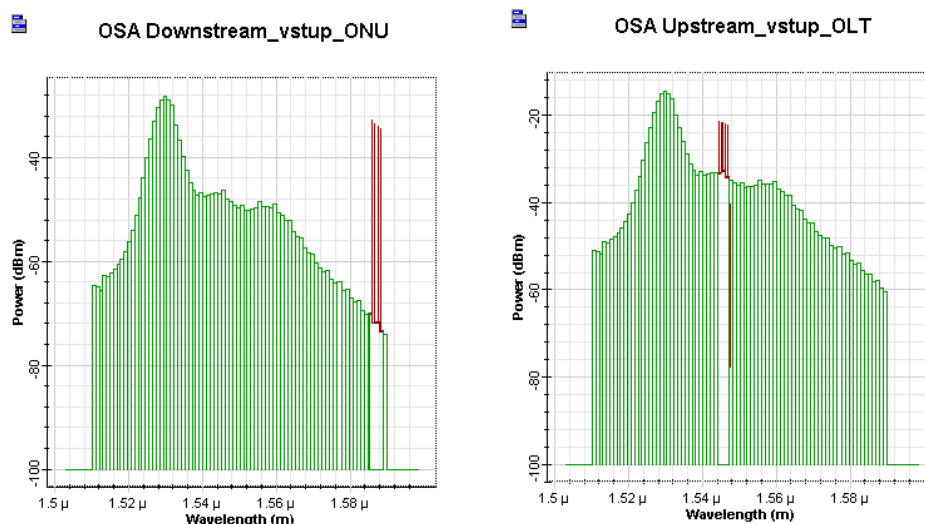
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	1.67492e-051	22.8292	3.26123e-011	6.52982
16. kanál	3.85282e-045	14.0489	1.45329e-012	6.98105
17. kanál	5.1821e-039	13.0111	7.51393e-009	5.65727
18. kanál	1.22253e-034	12,85	6.30097e-011	6.42567

Tabulka 1.43: *Chybovost a Q-faktor*

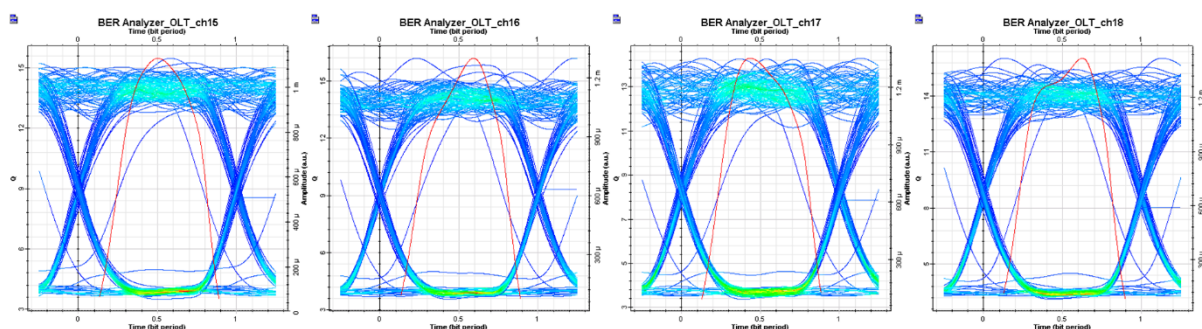
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.141917	-40.703408	34.227638	-26.200169	-28.918503	0.47572269
16. kanál	-24.142014	-40.212002	32.913653	-26.200377	-28.612121	-0.096888396
17. kanál	-24.142096	-39.69824	33.609606	-26.200212	-28.196521	-0.40008401
18. kanál	-24.142114	-39.174064	33.082393	-26.200405	-27.998869	0.39249224

Tabulka 1.44: *Výkon signálu a OSNR*

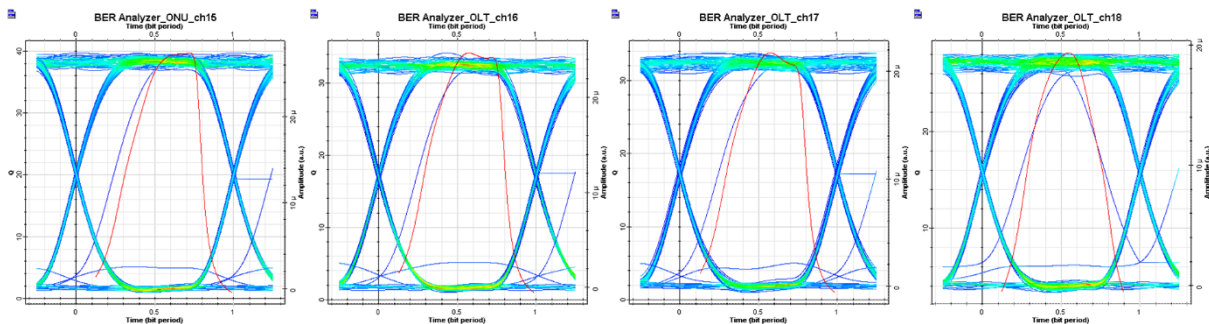
V sestupném směru dochází k velkému navýšení chybovosti a snížení Q-faktoru, i přesto, že hodnota OSNR se pohybuje kolem 33. Dochází k tomu z důvodu malého výkonu signálu. U vzestupného směru se nám dále zhoršuje OSNR, z toho důvodu se navyšuje chybovost, kterou můžeme z naměřených hodnot brát jako hraniční pro optickou komunikaci.



Obrázek 6.81: *Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr*



Obrázek 6.82: *Diagram oka pro OLT jednotky*



Obrázek 6.83: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.2.4 Délka trasy 125 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 125 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.45 a 1.46.

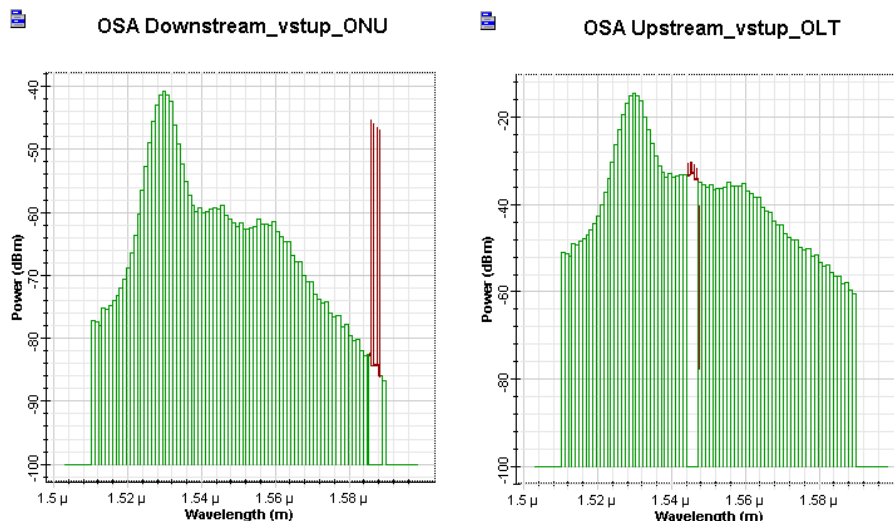
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	5.68664e-007	4.86321	0.0146516	2.17938
16. kanál	1.03655e-005	4,18	1	0
17. kanál	0.000220909	3.51126	1	0
18. kanál	0.000605312	3.22595	1	0

Tabulka 1.45: Chybovost a Q-faktor

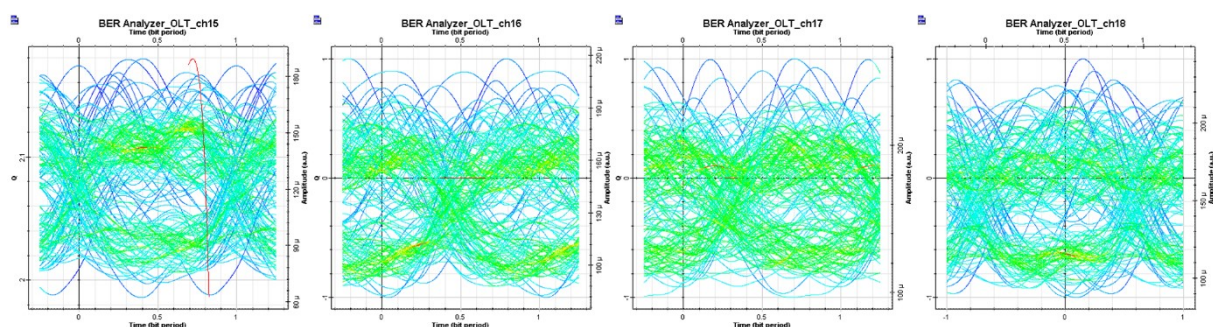
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.105344	-46.953408	34.227637	-26.183621	-35.250782	-5.8574828
16. kanál	-24.105367	-46.462001	32.913654	-26.18365	-35.77559	-7.2612955
17. kanál	-24.105323	-45.94824	33.609606	-26.18355	-34.562999	-6.7675087
18. kanál	-24.105416	-45.424064	33.082393	-26.183592	-34.217438	-5.8270424

Tabulka 1.46: Výkon signálu a OSNR

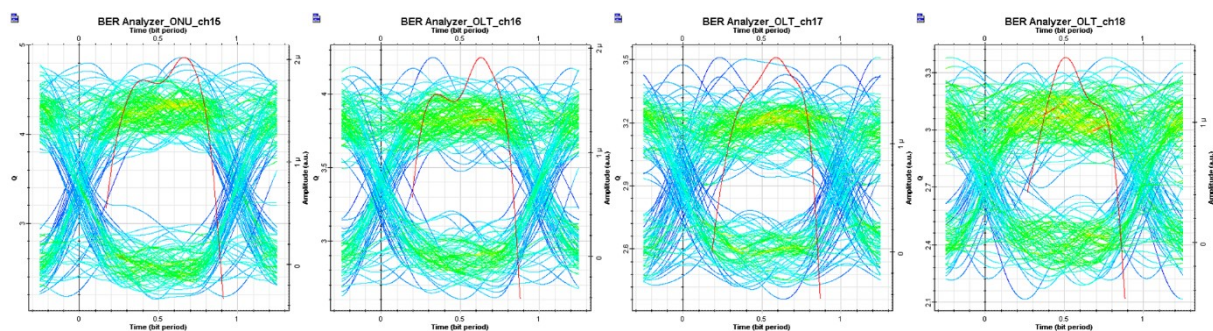
Při 125 km se spojení rozpadá v obou směrech. U sestupného směru se spojení rozpadá z důvodu slabých výkonů optických kanálů. Ve vzestupném směru máme záporné OSNR, tedy nedokážeme rozlišit šum od optického kanálu, jak lze vidět na obrázku optického spektra pro vzestupný směr. Z diagramu oka lze jasně vidět nerozeznatelnost mezi logickou 1 a 0.



Obrázek 6.84: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



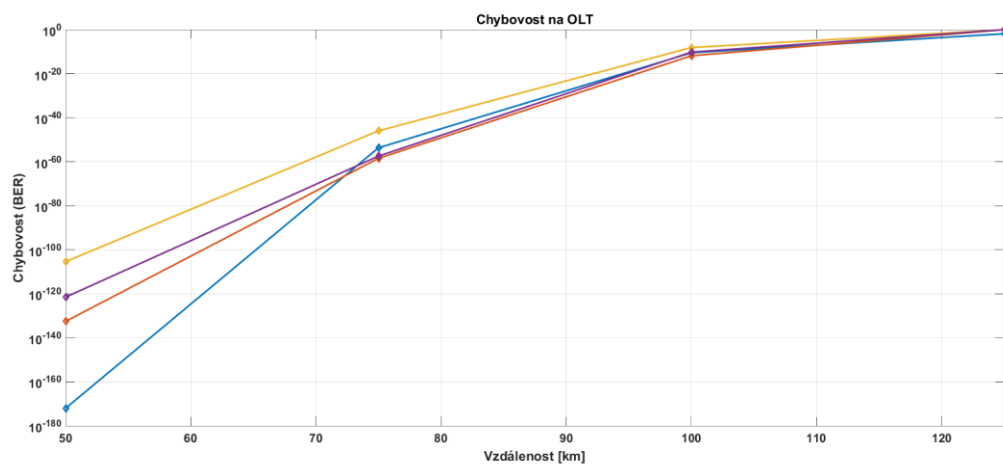
Obrázek 6.85: Diagram oka pro OLT jednotky



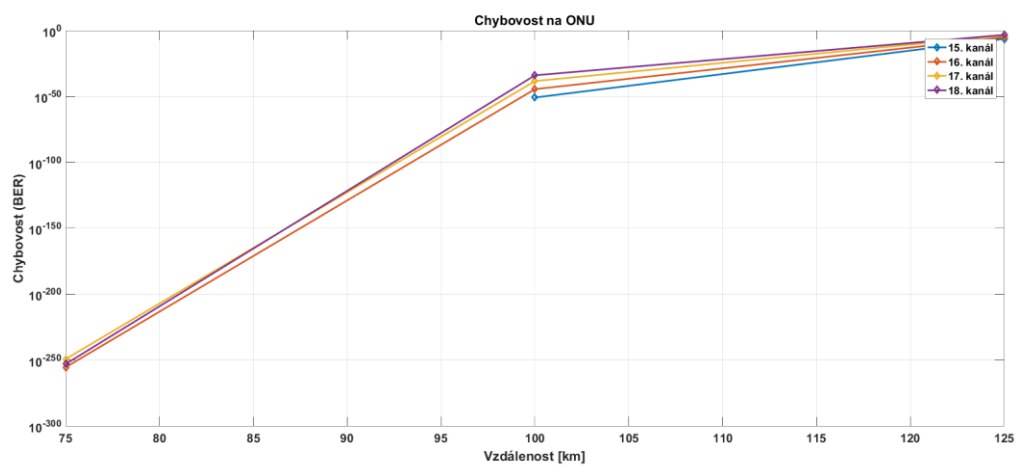
Obrázek 6.86: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.2.5 Grafické znázornění

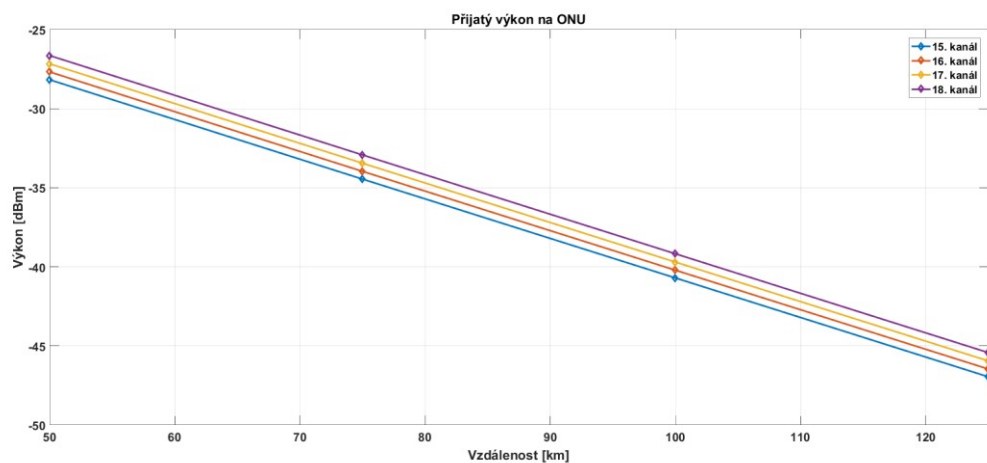
V grafech 6.87 - 6.90 jsou znázorněny chybovosti a výkony signálů všech měřených situací. Oproti referenčnímu měření jsme překlenuli až 100 km vzdálenost. Oproti tomu zde máme horší výsledky než při nasazení jako předzesilovače. V C pásmu dochází k velkému propadu OSNR a v L pásmu naopak k propadu výkonu samotného signálu.



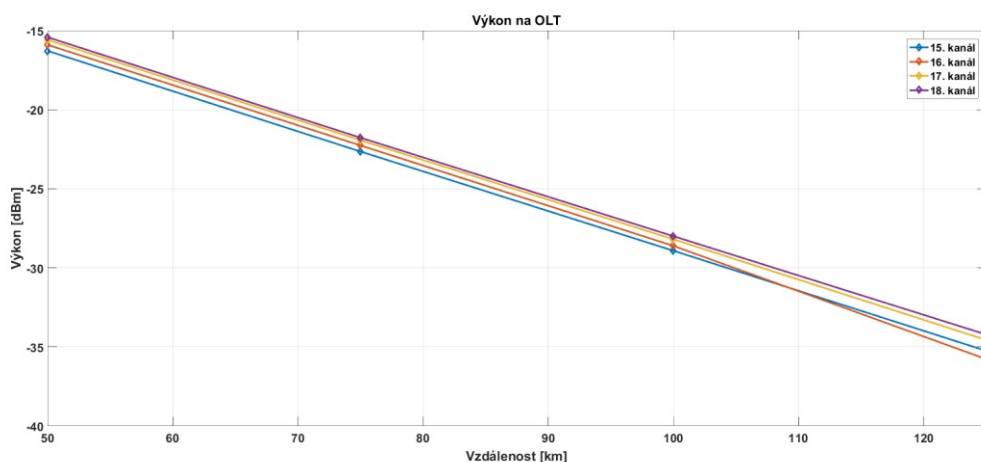
Obrázek 6.87: Chybovost pro OLT jednotky



Obrázek 6.88: Chybovost pro Onu jednotky



Obrázek 6.89: Výkon na ONU jednotkách



Obrázek 6.90: Výkon na OLT jednotkách

6.6.3 Trasa s nasazením EDFA zesilovače jako in-line

6.6.3.1 Délka trasy 50 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 50 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.47 a 1.48.

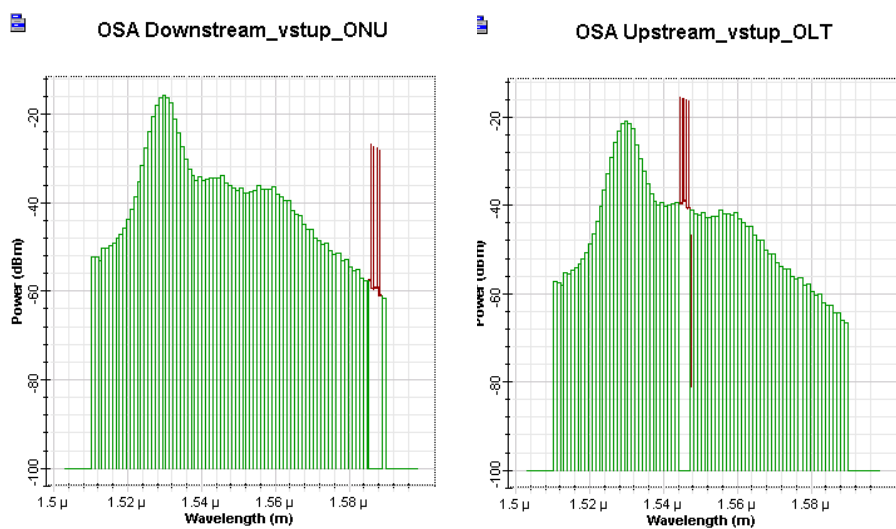
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	0	51.2279	3.55687e-304	37.2598
16. kanál	0	48.5802	0	38.7753
17. kanál	0	50.1655	2.75548e-293	36.5817
18. kanál	0	45.7471	2.77038e-295	36.7068

Tabulka 1.47: Chybovost a Q-faktor

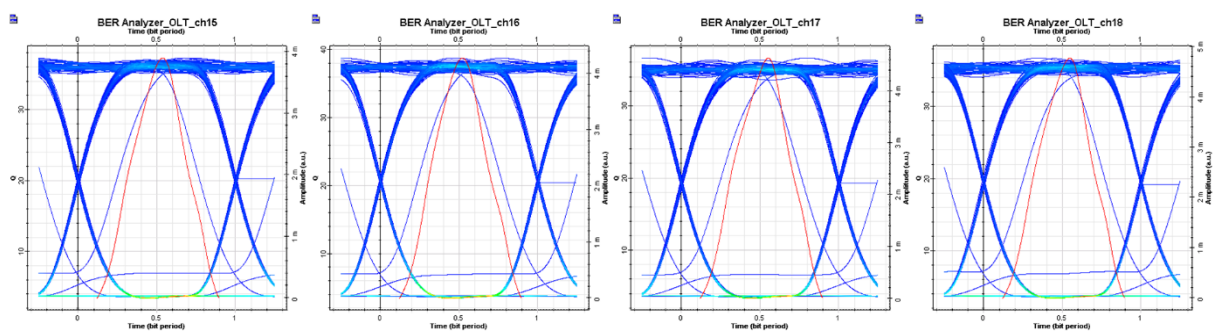
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.184333	-28.245459	27.851507	-26.183621	-16.466905	19.228585
16. kanál	-24.184266	-27.753145	26.674363	-26.18365	-16.083675	18.724112
17. kanál	-24.184544	-27.240013	27.278144	-26.18355	-15.787412	18.256367
18. kanál	-24.184529	-26.712092	26.812616	-26.183592	-15.630015	19.102278

Tabulka 1.48: Výkon signálu a OSNR

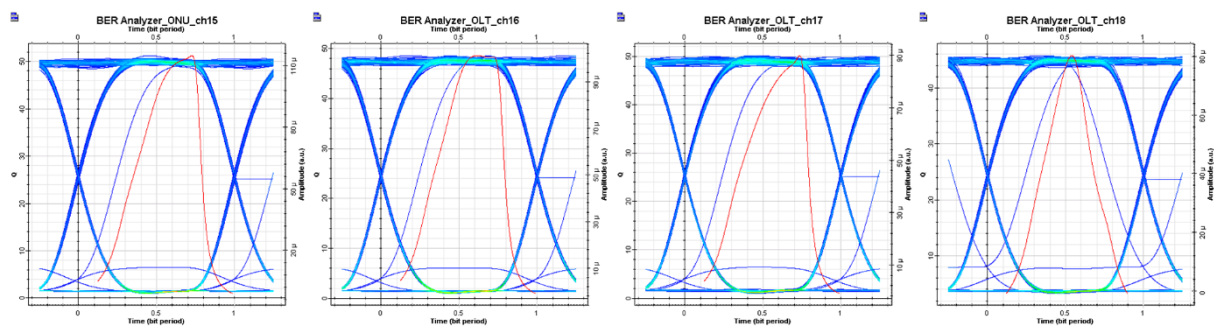
EDFA zesilovač jako in-line při 50 km oproti referenčnímu měření snížil chybovost v L pásmu na nulu a v C pásmu téměř na nulu. Ve vzestupném směru můžeme pozorovat větší zesílení než v sestupném směru. Tato skutečnost bude ovlivňovat i další měření.



Obrázek 6.91: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



Obrázek 6.92: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.93: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.3.2 Délka trasy 75 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 75 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.49 a 1.50.

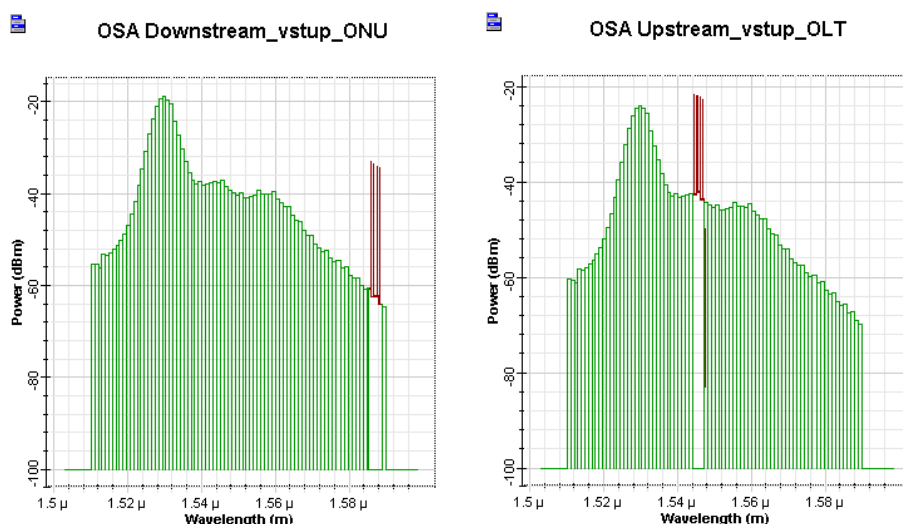
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	1.90883e-255	34.118	2.93407e-217	31.4393
16. kanál	3.50656e-229	32.2998	3.37852e-254	34.0347
17. kanál	9.22894e-232	32.4831	7.03271e-209	30.8202
18. kanál	5.95263e-242	33.197	7.66739e-220	31.6277

Tabulka 1.49: Chybovost a Q-faktor

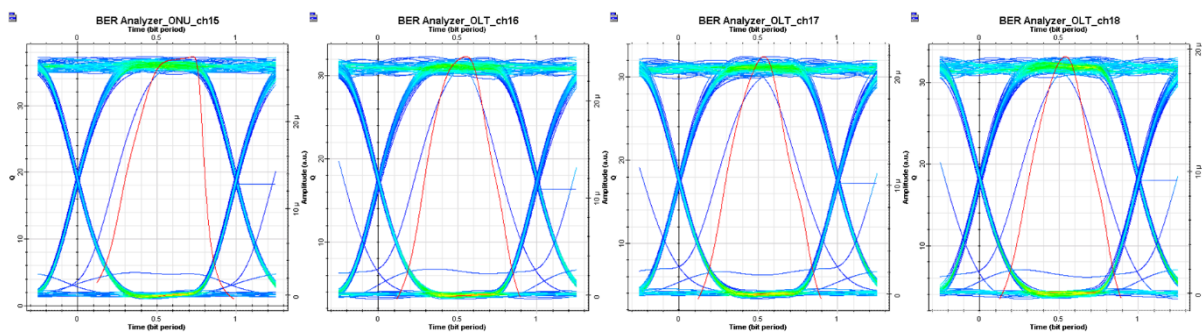
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.141917	-34.447049	24.798131	-26.183621	-22.689172	16.086156
16. kanál	-24.142014	-33.967229	23.512183	-26.18365	-22.302627	15.58483
17. kanál	-24.142096	-33.445922	24.179467	-26.18355	-21.998313	15.124293
18. kanál	-24.142114	-32.924972	23.742146	-26.183592	-21.838381	15.971908

Tabulka 1.50: Výkon signálu a OSNR

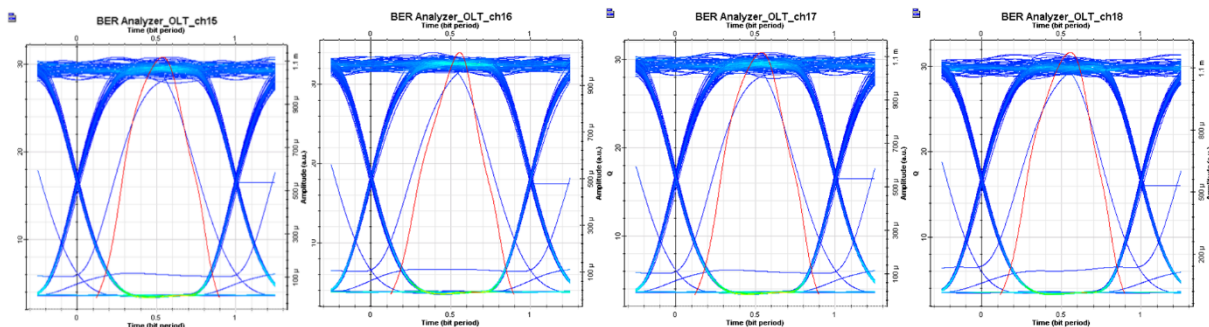
Při této délce optického vlákna a při použití EDFA zesilovače jako in-line je chybovost, OSNR i Q-faktor na podobných hodnotách. To lze také vyčíst z diagramů oka pro ONU i OLT jednotky. Výkon signálů pro sestupný směr je podstatně nižší i přes použitý zesilovač. Naopak výkon signálu pro vzestupný směr je dokonce vyšší než signál za vysílačem.



Obrázek 6.94: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



Obrázek 6.95: Diagram oka pro OLT



Obrázek 6.96: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.3.3 Délka trasy 100 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 100 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.51 a 1.52.

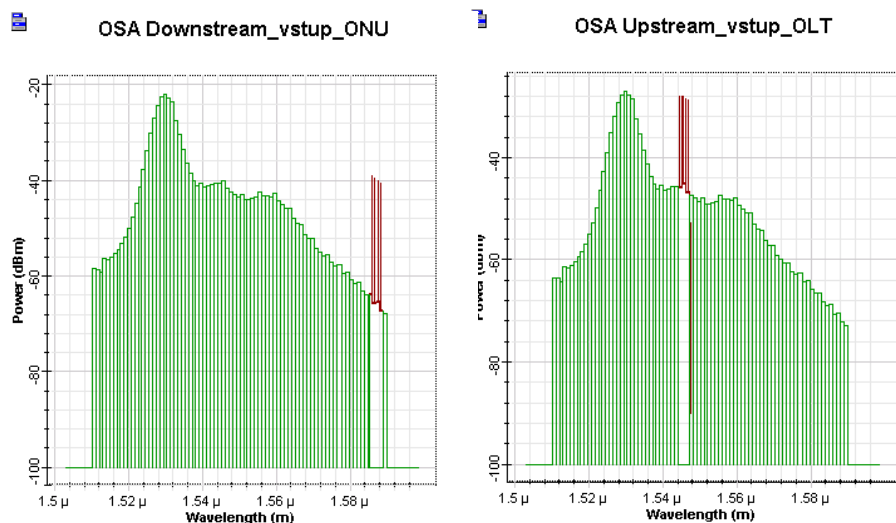
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	3.96068e-061	16.4533	1.18651e-144	25.5825
16. kanál	3.41175e-051	15.0048	1.03235e-137	24.9511
17. kanál	6.18676e-041	13.3467	2.42506e-140	25.1922
18. kanál	1.72166e-033	12.0013	1.61751e-151	26.1917

Tabulka 1.51: Chybovost a Q-faktor

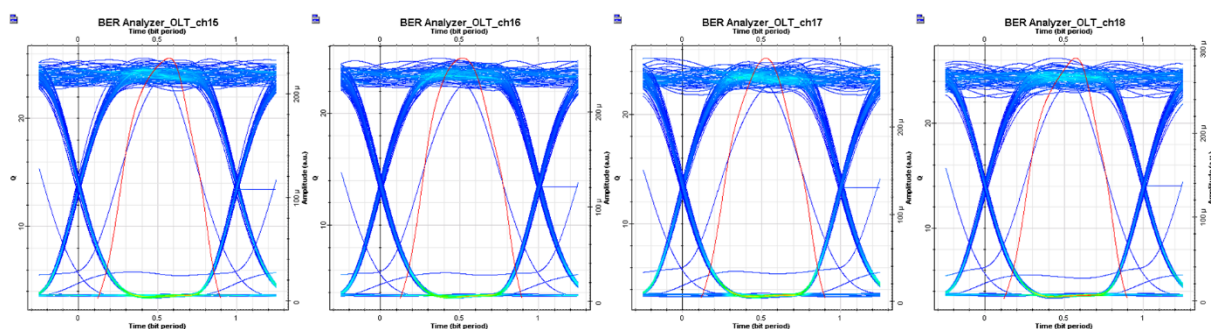
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.333784	-40.665606	21.681568	-26.095487	-28.774137	13.074649
16. kanál	-24.333839	-40.176363	20.460929	-26.09542	-28.403105	12.625592
17. kanál	-24.333705	-39.664539	21.105032	-26.095445	-28.087976	12.249755
18. kanál	-24.333805	-39.13046	20.657275	-26.095332	-27.925241	12.947967

Tabulka 1.52: Výkon signálu a OSNR

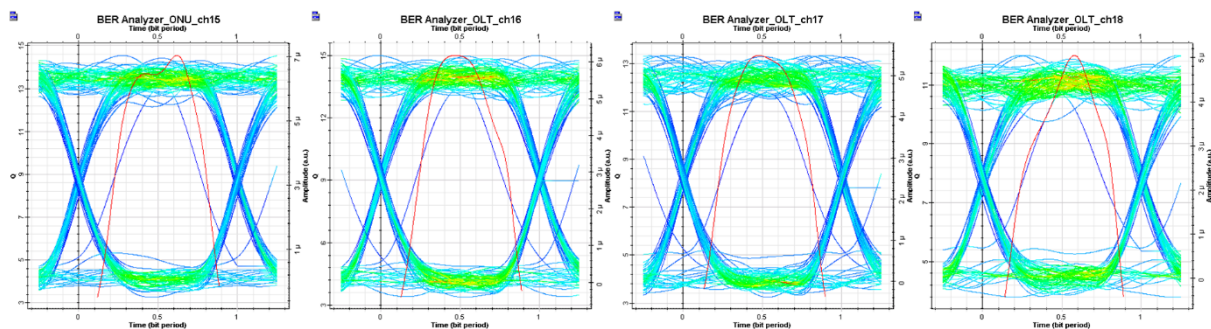
Dochází zde k velkému nárůstu chybovosti pro sestupný směr. S větší chybovostí klesá i Q-faktor. I přes lepší odstup signálu od šumu než v případě vzestupného směru, máme horší výsledky z důvodu slabého výkonu, tedy menšího zesílení pro L pásmo.



Obrázek 6.97: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



Obrázek 6.98: Diagram oka pro OLT jednotky



Obrázek 6.99: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.3.4 Délka trasy 125 km

Délka optického vlákna byla nastavena na hodnotu 125 km, naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 1.53 a 1.54.

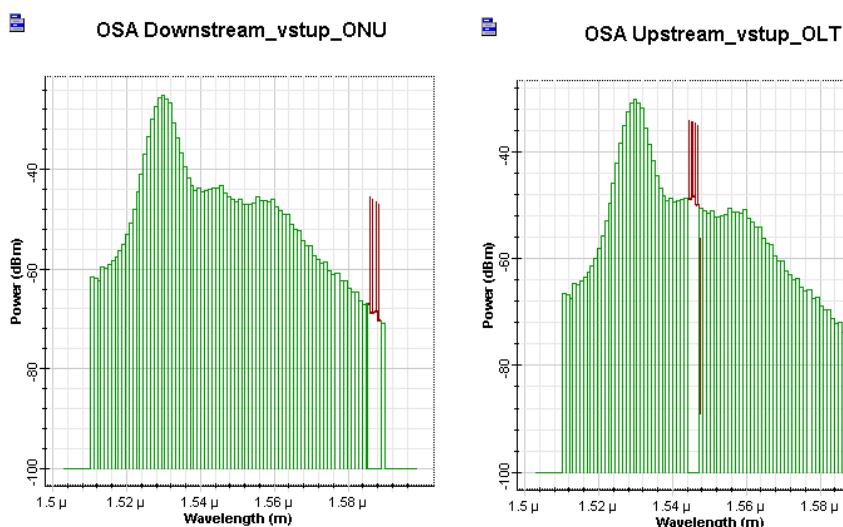
Kanál	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Chybovost	Q-faktor	Chybovost	Q-faktor
15. kanál	6.91426e-007	4.82474	9.70874e-097	20.8378
16. kanál	9.51935e-006	4.27069	1.04535e-085	19.5833
17. kanál	0.000228659	3.50213	5.78039e-080	18.8977
18. kanál	0.000691674	3.18824	1.277e-090	20.1514

Tabulka 1.53: Chybovost a Q-faktor

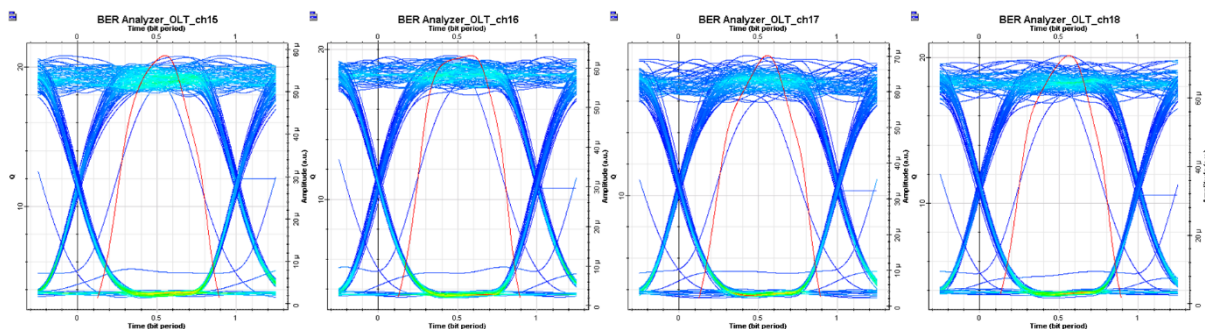
Kanál	Sestupný směr			Vzestupný směr		
	Výkon za OLT(dBm)	Výkon před ONU(dBm)	OSNR před ONU	Výkon za ONU(dBm)	Výkon před OLT(dBm)	OSNR před OLT
15. kanál	-24.105344	-46.953651	18.541425	-26.183621	-35.13277	9.8591525
16. kanál	-24.105367	-46.451644	17.277663	-26.18365	-34.786627	9.3170372
17. kanál	-24.105323	-45.942017	17.933249	-26.18355	-34.448431	8.8904535
18. kanál	-24.105416	-45.415254	17.50174	-26.183592	-34.291843	9.7336174

Tabulka 1.54: Výkon signálu a OSNR

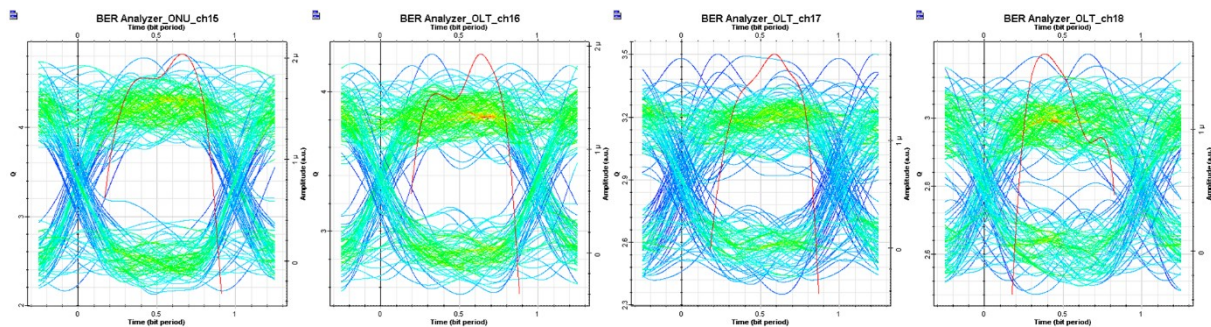
Stejně jako v případě 100 km trasy i zde dochází ke zvýšení chybovosti především v sestupném směru ze stejného důvodu, tedy nízkým výkonem optických kanálů v L pásmu. Nárůst chybovosti jde zde však natolik velký, že dochází k rozpadu spojení, jak lze pozorovat z diagramu oka pro ONU jednotky. Stejně jako v případě předzesilovače jsou kanály z C pásma stále rozlišitelné, teoreticky by dokázaly překlenout delší vzdálenost. Avšak hodnoty OSNR jsou již na nižší úrovni než v případě předzesilovače.



Obrázek 6.100: Optické spektrum na konci trasy pro sestupný (vlevo) a vzestupný (vpravo) směr



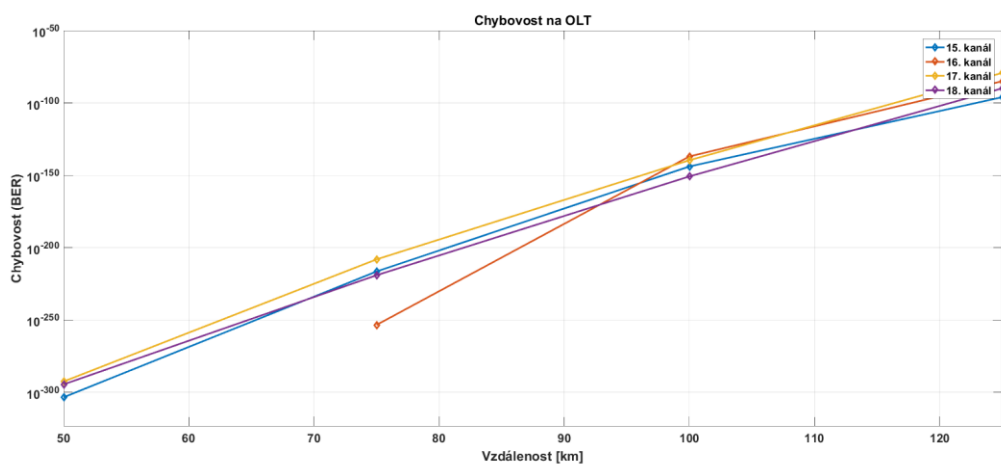
Obrázek 6.101: Diagram oka pro OLT jednotky



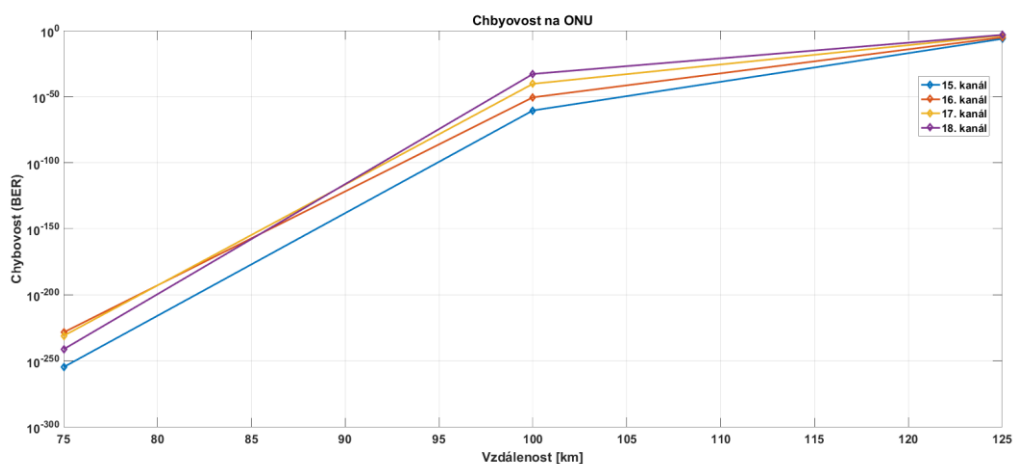
Obrázek 6.102: Diagram oka pro ONU jednotky

6.6.3.5 Grafické znázornění

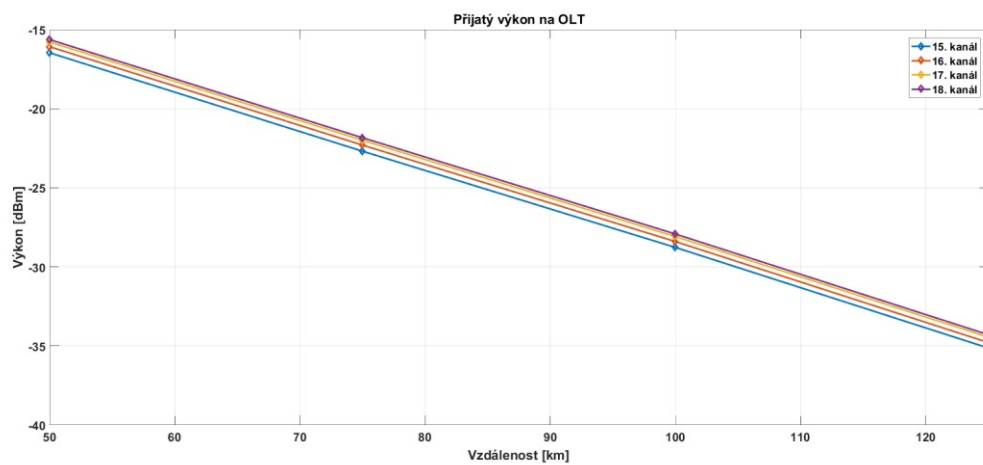
V případě nasazení zesilovače jako in-line vidíme, že ve vzestupném směru bychom dosáhli delší vzdálenosti. V sestupném směru nás limituje výkon signálu v L pásmu.



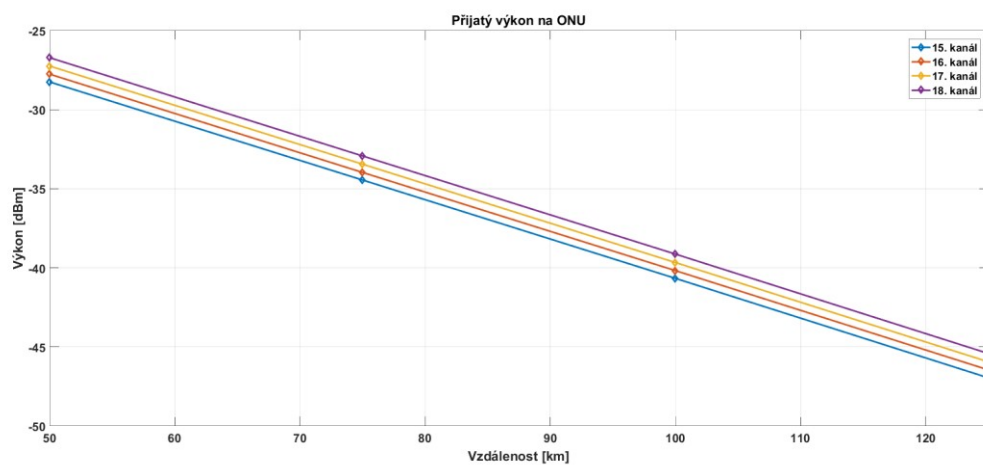
Obrázek 6.103: Chybovost ve vzestupném směru



Obrázek 6.104: Chybovost v sestupném směru



Obrázek 6.105: Přijatý výkon ve vzestupném směru



Obrázek 6.106: Přijatý výkon v sestupném směru

7 Zhodnocení

7.1 Zhodnocení pro topologii s FP laserem

U topologie s použitým Fabry-Perotovým laserem jsme dosáhli rozdílných výsledku. Bez zesilovače jsme dokázali překlenout vzdálenost až 75 km. Poté byl již přijatý výkon velice slabý a začalo docházet k chybovosti.

Při nasazení EDFA zesilovače do distribuční části topologie jako předzesilovač došlo ihned ke zvýšení chybovosti i na trase, kde bez zesilovače byla chybovost nulová. Dosáhli jsme zde stejné překlenuté vzdálenosti (tedy 75 km) jako v případě referenčního měření. Přijatá výkonová úroveň byla o poznání lepší, ale snížil se nám odstup signálu od šumu pro L pásmo což zapříčinilo vysokou chybovost.

Když jsme EDFA zesilovač nasadili jako booster, znovu došlo ke zhoršeným výsledkům, tentokrát u vzestupného směru. Již při 50 km byla chybovost na hranici použitelnosti pro optickou komunikaci. Znovu byla chybovost zapříčiněná nízkým OSNR. Na delší vzdálenosti jsme nedosáhli.

Jako jediná topologie, která dokázala překlenout vzdálenost 100 km, se jeví při použití zesilovače jako in-line zesilovač, tedy zesilovač připojen uprostřed optické trasy. Po 100 km zde ale také byla chybovost na teoretické hranici pro vzestupný směr.

Rozdílné výsledky mezi referenčním měřením a měřením s EDFA zesilovačem jsou ovlivněny použitým optickým zdrojem a přenastavení fotodiody a samotného zdroje, které nám byly doporučeny odborníky z Optiwave. Při zapojení EDFA zesilovače dochází k zesílení šumu, který produkuje samotný optický zdroj, a proto dochází i ke snižování OSNR.

7.2 Zhodnocení pro topologii s komponentou *WDM transmitter*

U této topologie při nasazení EDFA zesilovače jako předzesilovač došlo ihned ke zlepšení všech sledovaných parametrů. Oproti referenčnímu měření jsme při délce optické trasy 50 km dosáhli skoro nulové chybovosti pro L i C pásmo a dosáhli jsme zde překlenuté vzdálenosti 100 km. Poté byla přijatá výkonová úroveň nízká. Zatímco u C pásma bychom mohli překlenout ještě delší vzdálenost.

Při měření se zesilovačem jako booster byly parametry oproti referenčnímu měření také lepší, avšak nebyly srovnatelné jako u předešlého měření. Pro sestupný směr a 50 km byla chybovost nulová a u vzestupného směru byla chybovost kolem 10^{-150} . Také zde jsme překlenuli vzdálenost 100 km, ale chybovost a OSNR nebyla ani pro jeden směr ideální, kdy pro vzestupný směr jsme změřili OSNR dokonce záporné.

V posledním měření při zapojení zesilovače jako in-line zesilovač znovu došlo k výraznému zlepšení všech parametrů oproti referenčnímu měření. Také zde jsme dosáhli překlenutí 100 km. Při dalším navyšování trasy došlo k rozpadu spojení v sestupném směru kvůli nízkému výkonu.

Nejlépeší výsledky jsme dosáhli se zesilovačem nasazeným jako předzesilovač a následně jako in-line zesilovač. V těchto měření nám došlo k rozpadu spojení z důvodu malého zesílení v L pásmu, tedy pro sestupný směr. To se dalo čekat, jelikož použitý zesilovač je určen především pro C pásmo. Pro delší vzdálenosti bychom mohli uvažovat o použití druhého EDFA zesilovače, který by zesiloval v

L pásmu. To sebou nese ale další problémy. Každý ze zesilovačů by do optické trasy také vkládal ASE šum, který by zesilovač za ním také zesílil, což by znamenalo snížení OSNR. Toto by se dalo řešit použitím vhodných optických filtrů. Takovéto řešení by bylo již v praktickém využití finančně mnohem náročnější.

8 Závěr

Cílem této práce bylo otestovat vláknově optické zesilovače pro WDM-PON síť a zjištění maximálního dosahu takovéto sítě. Práce byla simulační.

V prvních třech kapitolách jsou rozepsány přístupové sítě, zejména pasivní přístupová síť, jsou zde jejich parametry, principy a specifiky.

V následující kapitole je rozepsán vlnový multiplex. Jeho principy a nepoužívané systémy na něm založené.

Pátá kapitola popisuje komponenty použité ve WDM-PON sítích. Zejména se zde zabýváme optickými zesilovači, jejich principy fungování, výhody, nevýhody a způsob použití. Popisujeme zde EDFA zesilovač, polovodičový (SOA) zesilovač a Ramanův zesilovač.

V šesté kapitole je provedena samotná simulace WDM-PON sítě s nasazením EDFA zesilovače v programu OptiSystem. V programu jsou nasimulovány dvě sítě, jedna s použitím FP laserů a druhá s použitím komponenty *WDM transmitter*. Pro obě sítě je nasimulován obousměrný provoz se čtyřmi ONU jednotkami, vysílací výkony byly nastaveny stejně, jako měla změřená topologie v laboratoři EB316. Přenosová rychlost je nastavena na 100 Mbit/s symetricky. Pro vzestupný směr jsou použity kanály z L pásma a pro sestupný směr kanály z C pásma. Délka optické trasy se měnila s krokem 25 km od 50 km až po 125 km. Do distribuční části topologie byl poté vložen EDFA zesilovač na příslušné místo v trase, tedy buď jako předzesilovač, booster nebo in-line zesilovač. Parametry zesilovače odpovídaly reálnému optickému zesilovači. Na konci trasy jsme měřili pro každý kanál přijaté výkonové úrovně, OSNR, BER a Q-faktor.

V sedmé kapitole jsou slovně shrnuty veškeré naměřené výsledky. Měření s FP lasery bylo hodně ovlivněno nastavením laserů a fotodetektorů, kdy byla poskytnutá odborná pomoc z firmy Optiwave. Jediná topologie s využitím zesilovače jako in-line zesilovač předčila referenční měření bez použití zesilovače. Každé měření s použitou komponentou *WDM transmitter* a EDFA zesilovačem předčilo referenční měření. Nejlepší hodnoty ukázal zesilovač jako předzesilovač a in-line zesilovač. Zde jsme dosáhli na vzdálenost 100 km a při vhodném nasazení dalšího zesilovače pracujícím v L pásmu bychom mohli teoreticky dosáhnout delší vzdálenosti.

Použitá literatura

- [1] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. Optické přístupové sítě a přípojky FTTx. Vydání 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05463-5.
- [2] VODRÁŽKA, J. Základy FTTx. Access server [online]. 2006 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: [http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=zaklady-
fttx&cislocclanku=2006051702](http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=zaklady-
fttx&cislocclanku=2006051702)
- [3] VODRÁŽKA, J. Optické přístupové sítě EPON a CWDM. Access server [online]. 2005 [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=&cislocclanku=2005070401>
- [4] HAVLIŠ, Ondřej. Pasivní optické sítě WDM-PON. Brno, 2012. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR MÜNSTER.
- [5] TŘETINA, Vítězslav. Moderní optické přístupové sítě. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. RADIM ŠIFTA.
- [6] HORNÍČEK, Lukáš a Miloslav Filka. Optická síť FTTH. Elektrevue [online]. 2012, 14(1) [cit. 2015-12-10]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/opticka-sit-ftth/>
- [7] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. Rozvoj přípojek FTTx. Elektrevue [online]. 2010, 12(2) [cit. 2015-12-10]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: [http://www.elektrevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/rozvoj-pripojek-
fttx/](http://www.elektrevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/rozvoj-pripojek-
fttx/)
- [8] ŠIFTA, Radim. DWDM v přístupových sítích. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ. Vedoucí práce Miloslav Filka.
- [9] GROBE, K. PON Evolution from TDMA to WDM-PON. IEEE Xplore [online]. 2008, 2008: 1-7 [cit. 2015-12-11]. DOI: 10.1109/OFC.2008.4528293. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4512186/4528018/04528293.pdf>
- [10] ITU-T: G.694.2 - Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid. [online], [cit. 2015-12-11]. ITU-T, 2003. Dostupné z https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.2-200312-I!!PDF-E&type=items
- [11] ITU-T: G.694.1 - Spectral grids for WDM applications: DWDM wavelength grid. [online], [cit. 2015-12-11]. ITU-T, 2012. Dostupné z https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-I!!PDF-E&type=items
- [12] HUTCHESON, Lynn. FTTx: Current Status and the Future. IEEE Communications Magazine [online]. 2008, 9.6. 2008, 46(7): 90-95 [cit. 2015-12-14]. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4557048. ISSN 0163-6804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4557048>

- [13] 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) [online]. IEEE, 2014 [cit. 2015-12-14]. ISBN 978-1-4799-5601-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6876282>
- [14] WARTAK, Marek S. Computational photonics: an introduction with MATLAB. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013, xiii, 452 pages. ISBN 978-110-7005-525.
- [15] ČECH, Martin. OPTICKÉ ZESILOVAČE PRO METROPOLITNÍ A PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Vladimír Tejkal.

Seznam příloh

Příloha na CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

- FP lasery (adresář)
- booster (adresář)
- 100Km (adresář)
- 50km edfa (adresář)
- 75km edfa (adresář)
- inline (adresář)
- 100km edfa (adresář)
- 50km edfa (adresář)
- 75km edfa (adresář)
- naprazdno (adresář)
- 100km (adresář)
- 50km (adresář)
- 75 km (adresář)
- predzesilovac (adresář)
- 100km edfa (adresář)
- 50km edfa (adresář)
- 75km edfa (adresář)
- optical trans (adresář)
- booster (adresář)
- 100km edfa booster (adresář)
- 125km edfa booster (adresář)
- 50km edfa booster (adresář)
- 75km edfa booster (adresář)
- in-line (adresář)
- 100km (adresář)
- 125km (adresář)
- 50km (adresář)

----- 75km (adresář)
----- pre (adresář)
----- 100km (adresář)
----- 125km (adresář)
----- 50km (adresář)
----- 75km (adresář)
----- naprazdno (adresář)